

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Simulace usměrňovačů a DC/DC měničů v programu  
OrCAD PSpice**

**Simulation of Rectifiers and DC/DC Converters in  
OrCAD PSpice**

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Bohnjat**  
Studijní program: B2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2602R014 Aplikovaná a komerční elektronika  
Téma: Simulace usměrňovačů a DC/DC měničů v programu OrCAD PSpice  
Simulation of Rectifiers and DC/DC Converters in OrCAD PSpice

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te teoretický rozbor usměrňovačů a DC/DC měničů.
2. Vytvořte simulační modely usměrňovačů a DC/DC měničů v programu OrCAD PSpice.
3. Ověřte funkčnost simulačních modelů pro různé provozní stavy a zátěže.

Seznam doporučené odborné literatury:

Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 1. Plzeň: ZČU 2003.  
Vondrášek, F.: Výkonová elektronika. Svazek 2 - Měniče s vlastní komutací a bez komutace. Plzeň: ZČU 2003.  
Pavelka, J., Čeřovský, Z., Lettl, J.: Výkonová elektronika, Praha: skriptum ČVUT 2007.  
Rashid, M. H.: Power Electronics Handbook. Pensacola, Florida 2001.  
Záhlava, V.: OrCAD 10. Praha: Grada, 2004.

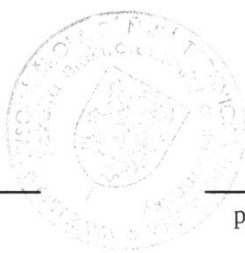
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Vaculík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7.5.2013

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Tato práce byla vypracována s podporou projektu Nové kreativní týmy v prioritách vědeckého bádání, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/30.0055 podpořeného Operačním programem Vzdělávání pro konkurenceschopnost a spolufinancovaného Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Děkuji především panu Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D za poskytnuté konzultace při přípravě mé bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá simulací usměrňovačů a DC/DC měničů pomocí programu OrCAD PSpice. V teoretické části práce je provedeno základní rozdělení usměrňovačů a stejnosměrných měničů a jsou vysvětleny základní funkce usměrňovačů jednopulzních, dvoupulzních, trojpulzních a šestipulzních, přičemž je předpokládána odporová zátěž. Další typy zátěží jsou vysvětleny na jednofázovém můstkovém zapojení. V teoretické části jsou také popsány funkce jednokvadrantových, dvoukvadrantových a čtyřkvadrantových stejnosměrných pulzních měničů. V závěru teoretické části je popsán programový balík OrCAD. V praktické části práce jsou vytvořeny simulační modely základních zapojení usměrňovačů a stejnosměrných měničů. Je zkoumáno chování usměrňovačů při různých typech zátěže a řídicích úhlech, u stejnosměrných měničů při různých zatěžitelnostech a výsledky jsou porovnány s teoretickými předpoklady.

## **Klíčová slova**

simulace, usměrňovač, DC/DC měnič, OrCAD PSpice,

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with simulation of rectifiers and DC/DC converters in OrCAD PSpice. In theoretic part, basic classification of rectifiers and DC/DC converters is carried out and basic functions of one-pulse, two-pulse, three-pulse and six-pulse rectifiers with resistor load are explained. Other types of loads are explained for single-phase bridge rectifier. Functions of one-quadrant, two-quadrant and four-quadrant DC/DC converters are described as well. OrCAD is described at the end of theoretic part. In practical part, simulation models of basic rectifiers and DC/DC converters are created. Function of rectifiers is examined for various types of load and firing angles and function of DC/DC converters for various duty cycles and results are compared with theoretic hypothesis.

## **Key Words**

simulation, rectifier, DC/DC converter, OrCAD PSpice,

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$\alpha$	°	řídící úhel
$\mu$	°	úhel komutace
$f$	Hz	frekvence
$I_C$	A	proud kolektoru
$i_d$	A	okamžitá hodnota proudu zátěže
$I_{GT}$	A	zapínací proud tyristoru
$T$	s	perioda
$U_{CE}$	V	napětí mezi kolektorem a emitorem
$u_d$	V	okamžitá hodnota napětí zátěže
$U_{d(AV)}$	V	střední hodnota napětí
$U_{DRM}$	V	maximální opakovatelné blokovací napětí
$U_i$	V	indukované napětí
$U_m$	V	maximální hodnota napětí
$U_p$	V	pilovité napětí
$U_{RRM}$	V	maximální opakovatelné závěrné napětí
$U_f$	V	řídící napětí
$U_{Sm}$	V	sdužené napětí
$Z$	-	zatěžovatel

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
CAD	Computer Aided Design	počítačem podporované projektování
GTO	Gate Turn-Off	vypínatelný tyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
PWM	Pulse-width Modulation	pulzní šířková modulace

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Polovodičové měniče .....	2
3	Usměrňovače.....	3
3.1	Rozdělení usměrňovačů .....	3
3.2	Jednofázový jednopulzní usměrňovač .....	4
3.3	Jednofázový můstkový usměrňovač.....	4
3.4	Trojfázový uzlový usměrňovač .....	5
3.5	Trojfázový můstkový usměrňovač .....	7
3.6	Jednofázový můstkový usměrňovač s různými typy zátěže.....	8
3.6.1	Zátěž RL .....	9
3.6.2	Zátěž RL s nulovou diodou .....	9
3.6.3	Zátěž RL s kladným protinapětím .....	10
3.6.4	Zátěž RL se záporným protinapětím .....	10
3.7	Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje .....	11
4	DC/DC měniče .....	13
4.1	Rozdělení stejnosměrných měničů.....	13
4.2	Způsoby řízení pulzních měničů .....	13
4.3	Snižující měnič.....	14
4.4	Zvyšující měnič.....	15
4.5	Dvoukvadrantový měnič s reverzací napětí .....	16
4.6	Dvoukvadrantový měnič s reverzací proudu.....	18
4.7	Čtyřkvadrantový měnič .....	18
5	Popis programu OrCAD.....	21
6	Simulace usměrňovačů.....	22
6.1	Jednofázový můstkový usměrňovač.....	22
6.2	Trojfázový uzlový usměrňovač .....	25
6.3	Trojfázový můstkový usměrňovač .....	26
6.4	Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje .....	27
7	Simulace DC/DC měničů .....	29
7.1	Blok PWM .....	29
7.2	Snižující měnič.....	30
7.3	Zvyšující měnič.....	31
7.4	Dvoukvadrantový měnič s reverzací napětí .....	32

7.5	Dvoukvadrantový měnič s reverzací proudu.....	34
7.6	Čtyřkvadrantový měnič .....	35
8	Závěr .....	37
	Použitá literatura .....	38
	Seznam příloh .....	39



# 1 Úvod

Výkonová elektronika má mnoho oblastí užití. Díky rychlému vývoji a zdokonalování spínacích součástek vznikly polovodičové měniče, které umožňují změny parametrů elektrické energie jako jsou frekvence, napětí, proud a počet fází. Uplatňují se v elektrických přístrojích v domácnostech, ale například i v dopravních prostředcích při řízení elektromotorů trakčních vozidel či elektromobilů.

V teoretické části práce jsou popsány základní druhy usměrňovačů a pulzních měničů. Chování usměrňovačů jednopulzních, trojpulzních a šestipulzních je popsáno na příkladech s čistě odporovou zátěží při nulových a nenulových řídicích úhlech. Vlastnosti usměrňovačů se zátěží odporově-induktivní, odporově-induktivní s nulovou diodou a odporově-induktivní s protinapětím jsou rozebrány na příkladu jednofázového můstkového usměrňovače. Dále jsou vysvětleny principy činnosti pulzních měničů jednokvadrantových, dvoukvadrantových a čtyřkvadrantových. Poměry výstupních veličin těchto měničů jsou popsány při přerušovaném i nepřerušovaném proudu. Práce také obsahuje základní popis programového balíku OrCad, pomocí kterého se provádí analýza v časové oblasti ke zkoumání chování usměrňovačů a měničů.

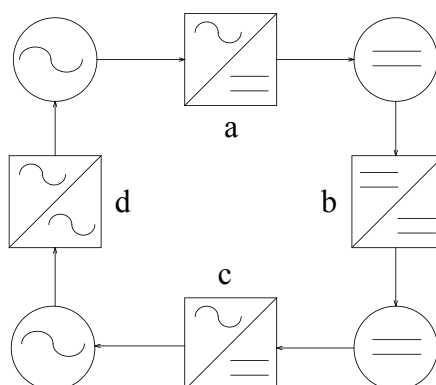
V praktické části práce jsou vytvořeny simulační modely usměrňovačů a pulzních měničů. Schémata jsou vytvořena v OrCad Capture, ve kterém je možnost širokého výběru součástek z knihoven a úprav parametrů modelů součástek. Simulace obvodů a zobrazení výsledků probíhá v programu PSpice. Modely jsou vytvořeny pro dvoupulzní, třípulzní a šestipulzní zapojení řízených usměrňovačů s tyristory. U těchto modelů se nastavuje různý řídicí úhel a mění parametry zátěže. Řídicím úhlem se nastavuje střední hodnota napětí na zátěži. Při nulovém řídicím úhlu se usměrňovače s tyristory chovají stejně jako neřízené usměrňovače s diodami. Nastavované parametry zátěže mohou být hodnoty odporu, indukčnosti a protinapětí, které představuje například indukované napětí motoru v generátorickém režimu. Velikosti těchto parametrů určují, zda je proud přerušovaný či nepřerušovaný, přičemž se tímto ovlivňuje i střední hodnota napětí na zátěži. U pulzních měničů se hodnota výstupního napětí řídí pravidelným přerušováním tekoucího proudu obvodu vhodným spínacím prvkem. Hodnota výstupního napětí se nastavuje poměrem doby zapnutí a vypnutí spínače. [1]

## 2 Polovodičové měniče

Aplikace polovodičových měničů ve výkonové elektronice je velmi rozsáhlá. S rozvojem polovodičových technologií se rychle zlepšují vlastnosti výkonových měničů, dosahují vysokých frekvencí spínání a jsou vyráběny pro vysoké výkony. Vliv na zlepšování vlastností měničů má i rozvoj mikropočítačových řídicích systémů, které jsou řídicí částí, výkonovou část tvoří polovodičové spínací součástky.

Výkonová elektronika prošla velkým rozvojem a dnes se používá v mnoha odvětvích. Užití měničů se vyskytuje v oblasti řízení motorů, trakčních vozidel, elektromobilů, dále například v běžných elektronických domácích zařízeních jako jsou počítače, mixéry, tiskárny a ledničky.

Charakteristickou vlastností polovodičových měničů je spínací režim součástek, pomocí kterého se dosahuje přeměny energie. Podle druhu vstupní a výstupní energie se výkonové měniče rozdělují na čtyři základní typy: usměrňovače (a), stejnosměrné měniče (b), střídače (c) a střídavé měniče (d) (Obr 2.1).



Obr. 2.1: Základní rozdělení polovodičových měničů [1]

Tato práce se zabývá usměrňovači, které přeměňují střídavý signál na stejnosměrný, a stejnosměrnými měniči, které mění velikost stejnosměrného napětí.

V měničích, které pracují na principu spínání a přerušování proudu obvodu, se dříve používaly selenové a rtuťové součástky. Koncem 19. století se začal používat první selenový usměrňovač a v první polovině 20. století se rozvinulo použití rtuťového usměrňovače např. v měnících elektrických drah. Poté se začaly vyrábět germaniové a křemíkové součástky, které využívají vlastností P-N přechodu. Nejprve vznikaly výkonové diody a tyristory, poté výkonové tranzistory. Později se začaly rozvíjet i vypínatelné součástky jako jsou GTO tyristory a IGBT tranzistory.

Polovodičové výkonové součástky se mohou rozdělit do tří skupin. První skupina jsou součástky neřízené (diody), druhá skupina obsahuje součástky s řízeným zapínáním (tyristory) a třetí typ jsou součástky s řízeným zapínáním a vypínáním (GTO tyristory, tranzistory). [1, 2]

### 3 Usměrňovače

Usměrňovač je zařízení používané k přeměně střídavé energie na stejnosměrnou. V minulosti se k usměrnění používaly například rotační elektrické stroje, motorgenerátory a rtuťové usměrňovače, dnes se používají polovodičové usměrňovače. U těchto usměrňovačů se využívají nelineární vlastnosti polovodičových součástek. K neřízenému usměrnění jsou používány diody, k řízenému usměrnění tyristory, pomocí kterých je velikost výstupního napětí říditelná.

Popisované usměrňovače jsou měniče se síťovou (vnější) komutací, to znamená, že součástky se vypínají v závislosti na okamžitých hodnotách napájecího napětí.

Funkce jednotlivých usměrňovačů bude vysvětlena pro zapojení s odporovou zátěží a průběhy zobrazeny vždy pro nulový řídicí úhel a pro řídicí úhel  $\alpha = 60^\circ$ . Funkce usměrňovače se zátěží typu RL, RL s nulovou diodou a RL s indukovaným napětím bude ukázána pro případ jednofázového můstkového zapojení.

#### 3.1 Rozdělení usměrňovačů

Podle způsobu řízení

- a) neřízený
- b) řízený

Podle způsobu zapojení

- a) uzlová zapojení
- b) můstková zapojení

Podle počtu fází napájecího napětí

- a) jednofázové
- b) třífázové
- c) vícefázové

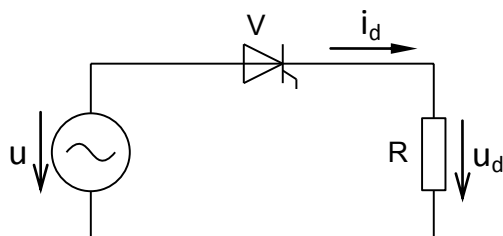
Podle průběhu výstupního napětí

- a) jednopulzní
- b) dvoupulzní
- c) trojpulzní
- d) šestipulzní
- e) dvanáctipulzní
- f) vícepulzní

[1]

### 3.2 Jednofázový jednopulzní usměrňovač

Jedná se o nejjednodušší zapojení usměrňovače a běžně se v průmyslových aplikacích nepoužívá. Obvod je tvořen pouze jednou diodou nebo tyristorem, zdrojem střídavého napětí a zátěží. Dioda či tyristor vede proud pouze při kladné půlvlně napájecího napětí. [1]



Obr. 3.1: Jednopulzní usměrňovač

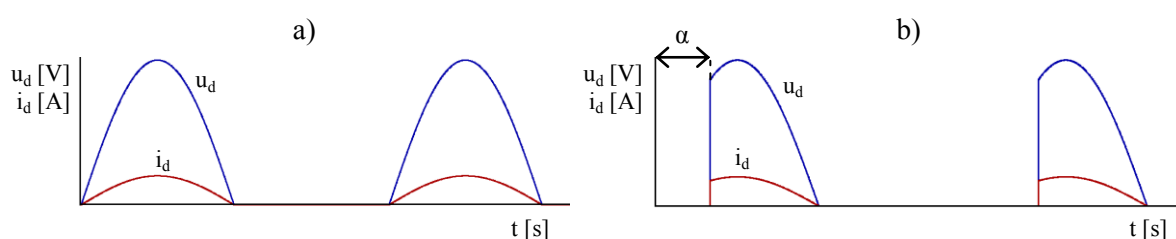
Střední hodnota usměrněného napětí při nulovém řídicím úhlu je:

$$U_{d0(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{U_m}{2\pi} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\pi} \cong 0,45 \cdot U \quad (3.1)$$

Střední hodnota usměrněného napětí při řídicím úhlu  $\alpha$  je:

$$U_{d\alpha(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t \quad (3.2)$$

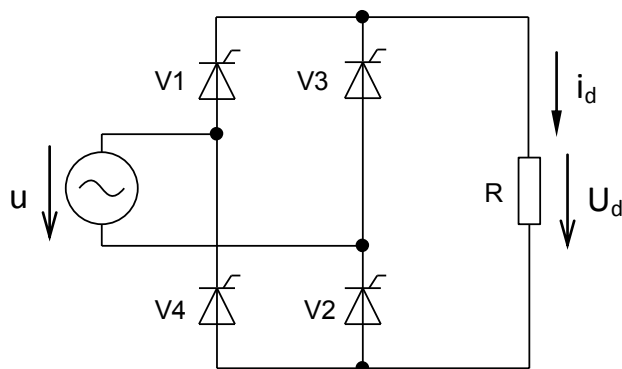
Na následujících obrázcích jsou průběhy výstupního napětí a proudu usměrňovače s nulovým řídicím úhlem a s řídicím úhlem  $\alpha = 60^\circ$ .



Obr. 3.2: Průběh napětí a proudu jednopulzního usměrňovače při –  
a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 60^\circ$

### 3.3 Jednofázový můstkový usměrňovač

Usměrňovač se skládá ze čtyř diod či tyristorů a jednofázového napájecího napětí. Napětí na výstupu je dvoupulzní, přičemž při kladné půlvlně napájecího napětí prochází proud tyristory V1 a V2 a při záporné půlvlně proud prochází tyristory V3 a V4 (Obr. 3.3).



Obr. 3.3: Jednofázový můstkový usměrňovač

Sřední hodnota usměrněného napětí při nulovém řídícím úhlu je:

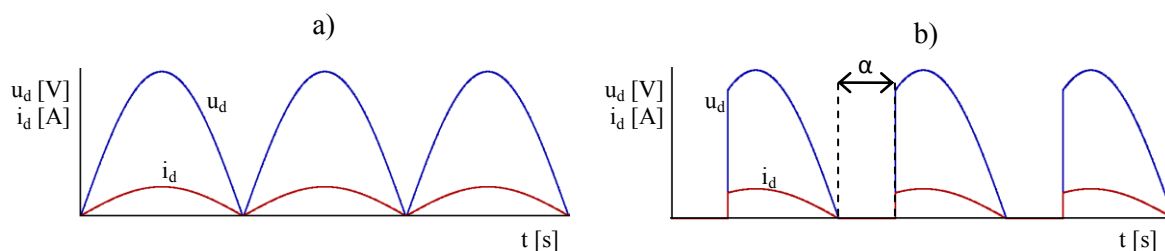
$$U_{d0(AV)} = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{U_m}{2\pi} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U}{\pi} \cong 0,9 \cdot U \quad (3.3)$$

Sřední hodnota usměrněného napětí při řídícím úhlu  $\alpha$  je:

$$U_{d0(AV)} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U \cdot (1 + \cos \alpha) = U_{d0(AV)} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (3.4)$$

[1]

Na následujících obrázcích jsou průběhy výstupního napětí a proudu usměrňovače s nulovým řídícím úhlem a s řídícím úhlem  $\alpha = 60^\circ$ .



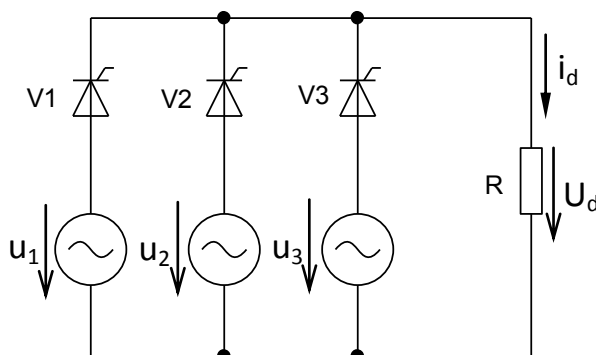
Obr. 3.4: Průběh napětí a proudu jednofázového můstkového usměrňovače při –  
a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 60^\circ$

### 3.4 Trojfázový uzlový usměrňovač

Trojfázové zapojení usměrňovačů se používá k usměrnění větších výkonů. Jejich výhoda je, že mají menší zvlnění usměrněného napětí a napájecí transformátor je zatěžován proudem s menším obsahem harmonických. Trojpulzní uzlové zapojení je na Obr. 3.5. V podstatě se jedná o složení tří jednocestných usměrňovačů s tím, že fáze napájecích napětí jsou vůči sobě posunuty o  $120^\circ$ .

Ze tří tyristorů může být sepnutý ten, který má blokovací napětí. Pokud je jeden z nich sepnutý, na zátěži je hodnota fázového napětí příslušného tyristoru. Na dalších dvou tyristorech je sdružené napětí mezi fází příslušného tyristoru a sepnutou fází. Tyristory se spínají postupně po  $120^\circ$ . V případě neřízeného usměrňovače vede proud dioda po dobu  $120^\circ$ , vždy ta, která je připojena na fázi s nejvyšší okamžitou hodnotou napětí.

Pro zapojení s odporovou zátěží a řídicí uhel  $\alpha$  v rozmezí  $0 < \alpha < 30^\circ$  je proud zátěže spojitý. Při vyšších řídicích úhlech je proud nespojitý. Úhel  $\alpha$  se počítá od průsečíku dvou fázových napětí (viz. Obr. 3.6b)



Obr. 3.5: Trojfázový uzlový usměrňovač

Střední hodnota usměrněného napětí při nulovém řídicím úhlu je:

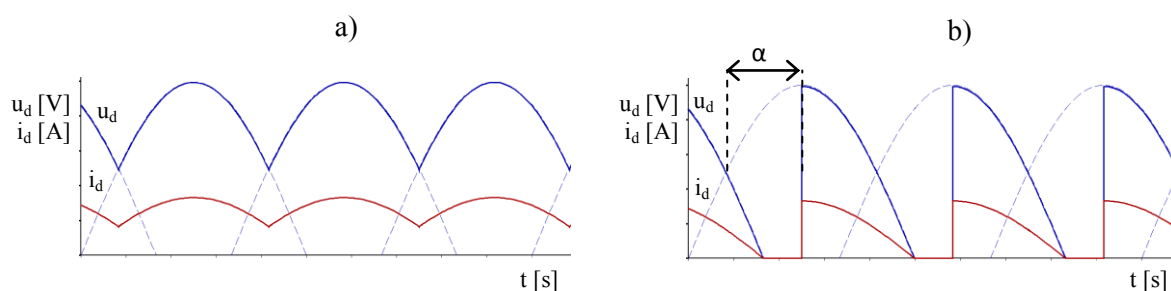
$$U_{d0(AV)} = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{5\pi}{6}} U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3U_m}{2\pi} [-\cos(\omega t)]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} = \frac{3\sqrt{6} \cdot U}{2\pi} \cong 1,17 \cdot U \quad (3.5)$$

Střední hodnota usměrněného napětí při řídicím úhlu  $\alpha$  a spojitý proud je:

$$U_{d\alpha(AV)} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3\sqrt{6} \cdot U}{2\pi} \cdot \cos \alpha = U_{d0(AV)} \cdot \cos \alpha \quad (3.6)$$

Střední hodnota usměrněného napětí při řídicím úhlu  $\alpha$  a nespojitý proud je:

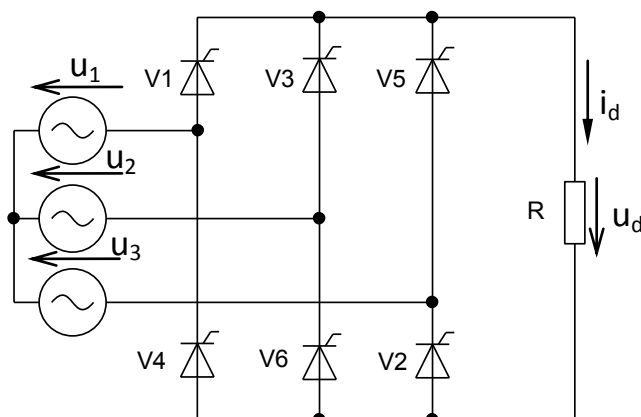
$$U_{d\alpha(AV)} = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha + \frac{\pi}{6}}^{\pi} U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3\sqrt{2} \cdot U}{2\pi} \cdot \left[1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)\right] \quad (3.7)$$



Obr. 3.6: Průběh napětí a proudu trojfázového uzlového usměrňovače při –  
a)  $\alpha = 0^\circ$ , b)  $\alpha = 60^\circ$

### 3.5 Trojfázový můstkový usměrňovač

Trojfázový můstkový usměrňovač se skládá ze šesti tyristorů a tří napájecích zdrojů, jejichž fáze jsou vůči sobě posunuty o  $120^\circ$ . Vždy je sepnutý jeden tyristor z anodové a druhý z katodové skupiny. Pokud se uvažuje nulový řídicí úhel, každý tyristor je ve vedení po dobu  $120^\circ$ . Pokud jsou například sepnuté tyristory V1 a V2, proud zátěže  $i_d$  se přes ně uzavírá a na zátěži je tedy sdružené napětí  $u_1 - u_3$ .



Obr. 3.7: Trojfázový můstkový usměrňovač

U tohoto usměrňovače je zapotřebí při chodu s přerušovaným proudem zdvojit zapínací impulzy tyristorů. To znamená, že po  $60^\circ$  od vyslání impulsu na tyristor musí být vyslán nový zapínací impuls. Místo zdvojení se také může využít jednoho obdélníkového impulsu, který má šířku větší než  $60^\circ$ . Protože je ale u tohoto způsobu hodně namáháno hradlo tyristoru, používá se řada impulsů jdoucích rychle po sobě.

Pro zapojení s odporovou zátěží a řídicí úhel  $\alpha$  v rozmezí  $0 < \alpha < 60^\circ$  je proud nepřerušovaný a střední hodnota napětí zátěže je dána vztahem (3.9). Při řídicím úhlu  $\alpha = 60^\circ$  je proud na mezi spojitosti. Při hodnotě řídicího úhlu nad  $60^\circ$  je proud odporové zátěže nespojitý a střední hodnota napětí je určena vztahem (3.10).

Na Obr. 3.8a jsou průběhy napětí a proudů usměrňovače s nulovým řídicím úhlem. Usměrněné napětí je tvořeno maximy jednotlivých sdružených napětí a proud zátěže kopíruje tvar tohoto napětí. Je patrné, že trojfázový můstkový usměrňovač je šestipulzní, přičemž jeden pulz

výstupního napětí trvá  $60^\circ$ . Výstupní průběhy pro řídící úhel  $\alpha = 60^\circ$  jsou na Obr. 3.8b, ze kterého je zřejmé, že proud zátěže je při tomto úhlu na mezi spojitosti.

Střední hodnota usměrněného napětí při nulovém řídícím úhlu je:

$$U_{d0(AV)} = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} U_{Sm} \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{6U_{Sm}}{2\pi} [-\cos(\omega t)]_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} = \frac{3\sqrt{6} \cdot U}{\pi} \cong 2,34 \cdot U \quad (3.8)$$

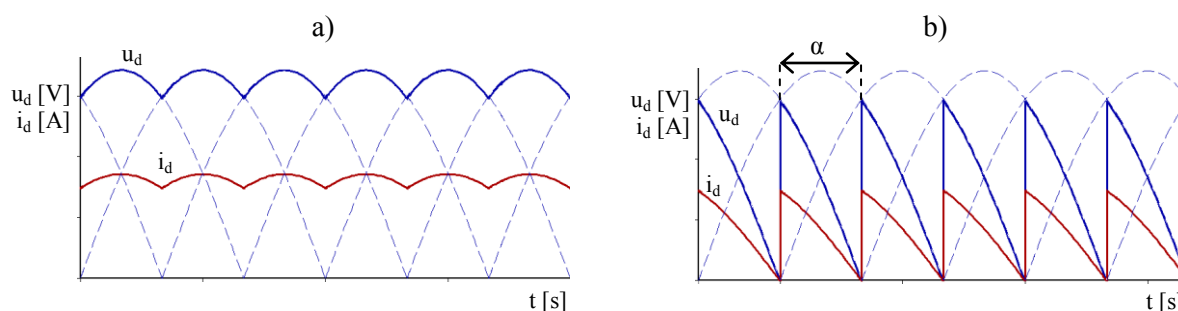
Střední hodnota usměrněného napětí při řídícím úhlu  $\alpha$  a spojitý proud je:

$$U_{d0(AV)} = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} U_{Sm} \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3\sqrt{2} \cdot U_S}{\pi} \cdot \cos \alpha = U_{d0(AV)} \cdot \cos \alpha \quad (3.9)$$

Střední hodnota usměrněného napětí při řídícím úhlu  $\alpha$  a nespojitý proud je:

$$U_{d0(AV)} = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}} U_{Sm} \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{3\sqrt{2} \cdot U_S}{\pi} \cdot \left[ 1 + \cos \left( \alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right] \quad (3.10)$$

[1, 3]

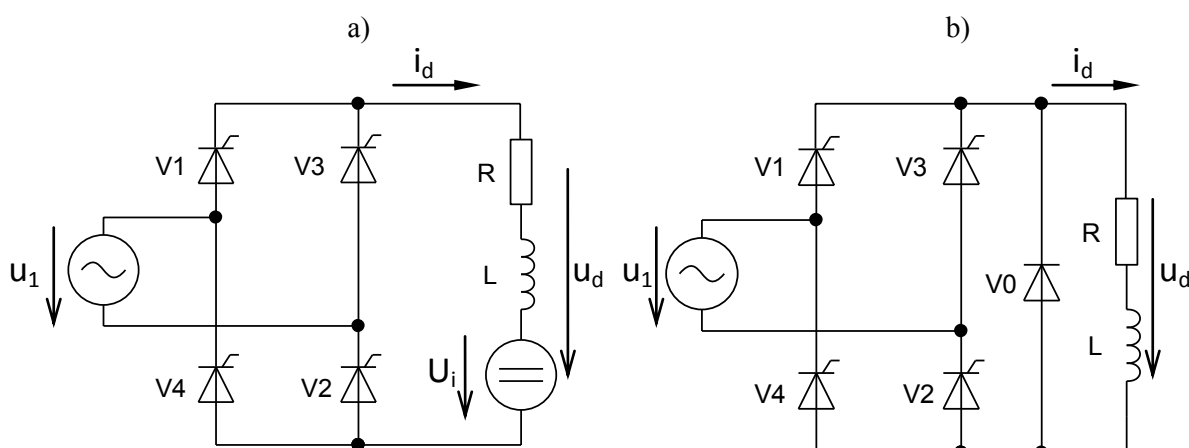


Obr. 3.8: Průběh napětí a proudu trojfázového můstkového usměrnovače při –  
a)  $\alpha=0^\circ$ , b)  $\alpha=60^\circ$

### 3.6 Jednofázový můstkový usměrnovač s různými typy zátěže

Na jednofázovém můstkovém usměrnovači bude vysvětleno, jak se usměrnovač chová s různými druhy zátěže při spojitém i nespojitém proudu. Ostatní zapojení usměrnovačů se s těmito zátěžemi chovají obdobně. Schéma zapojení se zátěží RL+U<sub>i</sub> je na Obr. 3.9a, na Obr. 3.9b je zapojení se zátěží RL a nulovou diodou.



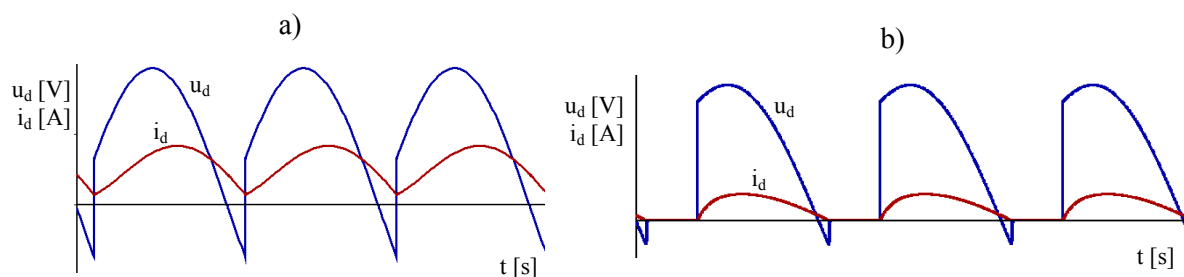


Obr. 3.9: Jednofázový můstkový usměrňovač –  
a) zátěž  $RL+U_i$ , b) zátěž  $RL$  s nulovou diodou

### 3.6.1 Zátěž $RL$

Zapojení obvodu je podle Obr. 3.9a, přičemž hodnota protinapětí je  $U_i = 0$ . Na Obr. 3.10a jsou průběhy usměrněného napětí a proudu při nepřerušovaném proudu, na Obr. 3.10b jsou průběhy při přerušovaném proudu. Kvůli indukčnosti v zátěži se proud za napětím fázově opožďuje. Díky tomu se může okamžitá hodnota výstupního napětí dostat i do záporných hodnot, protože procházející proud udržuje tyristory déle sepnuté. Střední hodnota usměrněného napětí při nepřerušovaném proudu se vypočítá dle vztahu (3.11). Z činnosti usměrňovače je zřejmé, že při nepřerušovaném proudu je střední hodnota napětí tím menší, čím déle trvá, než hodnota proudu klesne na nulu. [3]

$$U_{d0(AV)} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = U_{d0(AV)} \cdot \cos \alpha \quad (3.11)$$

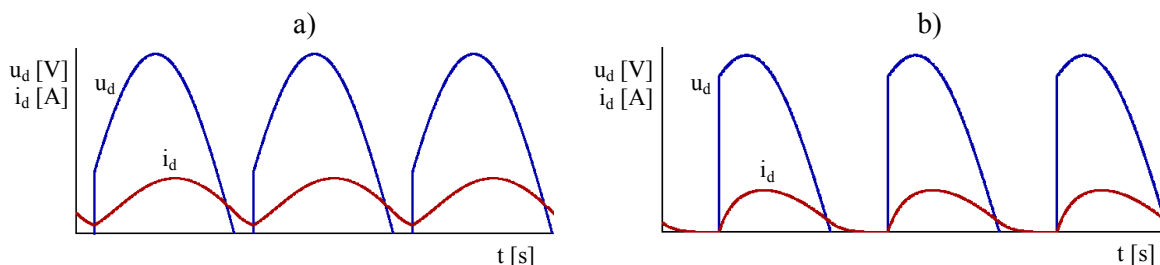


Obr. 3.10: Průběhy napětí a proudů jednofázového můstkového usměrňovače s  $RL$  zátěží –  
a) se spojitým proudem, b) s nespojitým proudem

### 3.6.2 Zátěž $RL$ s nulovou diodou

Schéma zapojení je na Obr. 3.9b. Nulová dioda připojená paralelně k zátěži neumožňuje záporné hodnoty výstupního napětí. V intervalech, kdy by bylo na zátěži záporné napětí (u zapojení bez nulové diody), uzavírá nulová dioda proud tekoucí zátěží. Na Obr. 3.11b lze vidět, že při

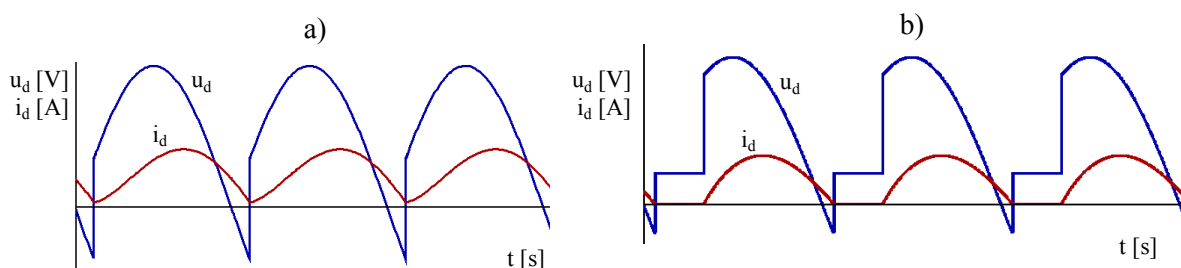
dosažení nulové hodnoty proudu je napětí také nulové až do příchodu dalšího řídicího impulsu. Jako důsledek použití nulové diody vyplývá, že toto zapojení zmenšuje efektivní hodnotu střídavé složky napětí a také není možný střídačový chod, jelikož není možné záporné napětí na zátěži. [3]



Obr. 3.11: Průběhy napětí a proudů jednofázového můstkového usměrňovače s RL zátěží a nulovou diodou – a) se spojitým proudem, b) s nespojitým proudem

### 3.6.3 Zátěž RL s kladným protinapětím

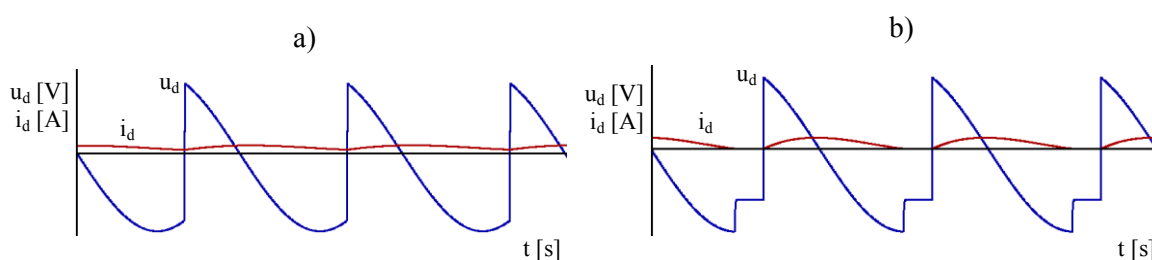
Zapojení usměrňovače je zobrazeno na Obr. 3.9a. Rozsah řídicího úhlu je omezen napětím  $U_i$ , protože ve chvíli, kdy je okamžitá hodnota napětí  $U_i$  větší jak okamžitá hodnota napájecího napětí, je na vypnutém tyristoru závěrné napětí a nemůže sepnout. Pokud by byla amplituda  $U_i$  větší než amplituda napájecího napětí, usměrňovač by nepracoval vůbec. Na Obr. 3.12a jsou průběhy při spojitém proudě. Průběhy jsou podobné průběhům zapojení bez  $U_i$ . Avšak při nespojitém proudě (Obr. 3.12b) v momentě klesnutí proudu na nulovou hodnotu se na zátěži objeví hodnota protinapětí. [3]



Obr. 3.12: Průběhy napětí a proudů jednofázového můstkového usměrňovače s  $RL+U_i$  zátěží – a) se spojitým proudem, b) s nespojitým proudem

### 3.6.4 Zátěž RL se záporným protinapětím

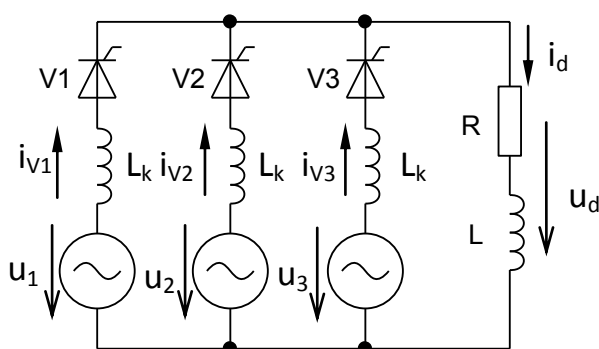
Zapojení usměrňovače je podle Obr. 3.9a, napětí  $U_i$  je záporné. Na obrázcích jsou průběhy pro  $\alpha = 120^\circ$ . Jelikož je střední hodnota napětí na zátěži záporná a proud je kladný, je také výkon záporný, to znamená, že se jedná o tzv. střídačový chod usměrňovače. Pro činnost při nepřerušovaném proudě platí, že do střídačového chodu se usměrňovač může dostat při řídicím úhlu větším než  $90^\circ$ . [3]



Obr. 3.13: Průběhy napětí a proudů jednofázového můstkového usměrňovače s  $RL-U_i$  zátěží – a) se spojitým proudem, b) s nespojitým proudem

### 3.7 Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje

Skutečné napájecí zdroje usměrňovačů mají vnitřní impedanci, přičemž pro tvar průběhu výstupního napětí je důležitá vnitřní reaktance. Skutečná komutace je vysvětlena na příkladu trojfázového uzlového zapojení (Obr. 3.14). Vnitřní reaktance zdroje je představována indukčností  $L_k$ , která způsobí, že komutace není okamžitá, ale trvá určitou dobu.



Obr. 3.14: Trojfázový uzlový usměrňovač s vnitřní reaktancí napájecího zdroje

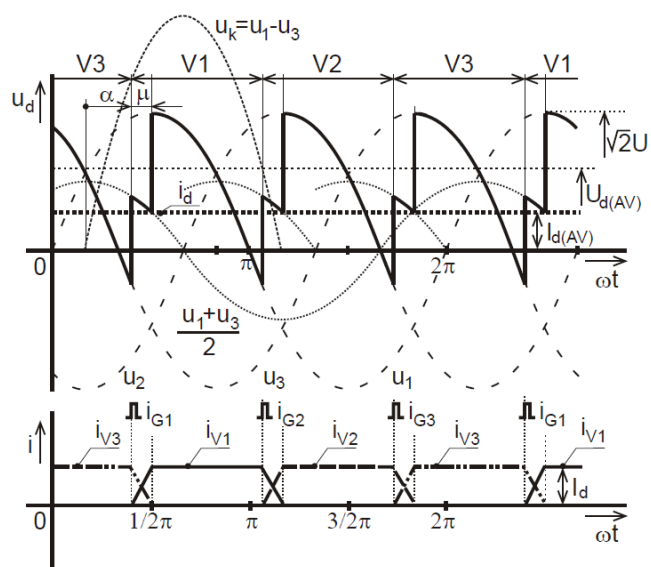
Skutečná komutace je vysvětlena pro případ komutace proudu z tyristoru V3 na V1 (Obr. 3.15). Začátek komutace je v okamžiku sepnutí tyristoru, tedy v úhlu  $\alpha$ . Proud  $i_{v3}$  v tomto momentě začíná klesat k nule a proud  $i_{v1}$  začíná růst k hodnotě  $i_d$ . Napětí na zátěži neodpovídá okamžitě napájecímu napětí, ale odpovídá hodnotě dané následujícím vztahem:

$$u_d = \frac{u_1 + u_3}{2} \quad (3.12)$$

Tohle napětí je na zátěži až do okamžiku, kdy proud  $i_{v3}$  klesne na nulovou hodnotu a  $i_{v1}$  vzroste na hodnotu  $i_d$ . Po skončení komutace je na zátěži napájecí napětí. Po celou dobu komutace platí pro hodnoty těchto proudů:

$$i_{v1} + i_{v3} = i_d \quad (3.13)$$

Doba, po kterou probíhá komutace, se označuje  $\mu$  (úhel komutace).



Obr. 3.15: Průběh napětí a proudu usměrňovače při skutečné komutaci [4]

## 4 DC/DC měniče

Stejnoseměrné měniče se používají pro změnu velikosti stejnosměrného napětí, přičemž výstupní hodnota napětí je řízena spínáním součástek. Používají se například v trakčních vozidlech jako jsou tramvaje, metro nebo lokomotivy. Tyto pulzní měniče jsou měniče s vlastní komutací, protože vypínání součástek neprobíhá v souvislosti se změnou polaritu napájecího napětí, ale jejich vypínání je řešeno komutačním obvodem. Spínací součástka může být realizována vypínatelným tyristorem nebo tranzistorem. [1]

### 4.1 Rozdělení stejnosměrných měničů

Podle funkce:

- a) snižující
- b) zvyšující
- c) snižující i zvyšující
- d) řízení odporu

Podle polaritu výstupního napětí a proudu:

- a) jednokvadrantové
- b) dvoukvadrantové
- c) čtyřkvadrantové

Podle způsobu řízení:

- a) s konstantním kmitočtem spínání
- b) s konstantní dobou sepnutí
- c) s dvouhodnotovým řízením

[5]

### 4.2 Způsoby řízení pulzních měničů

#### Řízení s konstantní spínací frekvencí

U tohoto způsobu řízení je spínací kmitočet neměnný, velikost výstupního napětí se řídí poměrnou dobou zapnutí a vypnutí spínacího prvku měniče. Tento způsob řízení je nejpoužívanější.

#### Řízení s konstantní dobou sepnutí

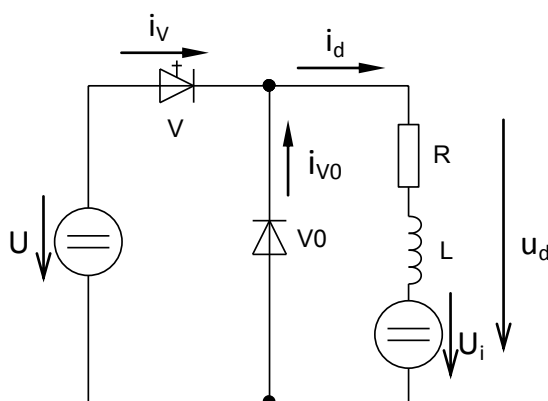
Doba sepnutí spínací součástky je konstantní a velikost výstupního napětí je řízena frekvencí spínání. Doba zapnutí je tedy neměnná a mění se doba periody.

#### Dvouhodnotové řízení

Toto řízení je založené na regulaci střední hodnoty výstupního proudu na žádanou hodnotu. V určitém rozmezí jsou nad i pod žádanou hodnotou horní a spodní hranice hodnoty proudu. Při dosažení horní hodnoty proudu se spínač vypíná a proud klesá, při dosažení spodní hranice se spínač zapíná a hodnota začne stoupat. Hodnota výstupního proudu se tedy pohybuje kolem žádané úrovně proudu. [5]

### 4.3 Snižující měnič

Snižující pulzní měnič slouží ke změně velikosti stejnosměrného napětí, přičemž střední hodnota výstupního napětí se může pohybovat v rozmezí od nulové hodnoty po hodnotu napájecího napětí. Měnič se skládá ze stejnosměrného zdroje napětí, spínacího prvku, nulové diody a zátěže. Spínacím prvkem může být vypínatelný tyristor či tranzistor. Zátěž může být pasivní nebo aktivní (se stejnosměrným protinapětím  $U_i$ ). Aby měnič pracoval správně, musí být hodnota napájecího napětí větší než hodnota protinapětí.



Obr. 4.1: Sníživací měnič

Na schématu (Obr. 4.1) je zapojení pulzního měniče s aktivní zátěží. Pokud je spínač sepnutý, na zátěži je napájecí napětí a proud tekoucí zátěží exponenciálně roste. Energie se přenáší ze zdroje do zátěže, část energie se ztrácí na odporu, část se akumuluje v indukčnosti a část přijímá zdroj protinapětí. Po vypnutí spínače je na zátěži nulové napětí a díky energii naakumulované v indukčnosti teče klesající proud zátěží a uzavírá se přes nulovou diodu. Poté se proces opakuje. Pokud proud během intervalu vypnutého spínače neklesne na nulu, je nepřerušovaný a střední hodnota napětí na zátěži je:

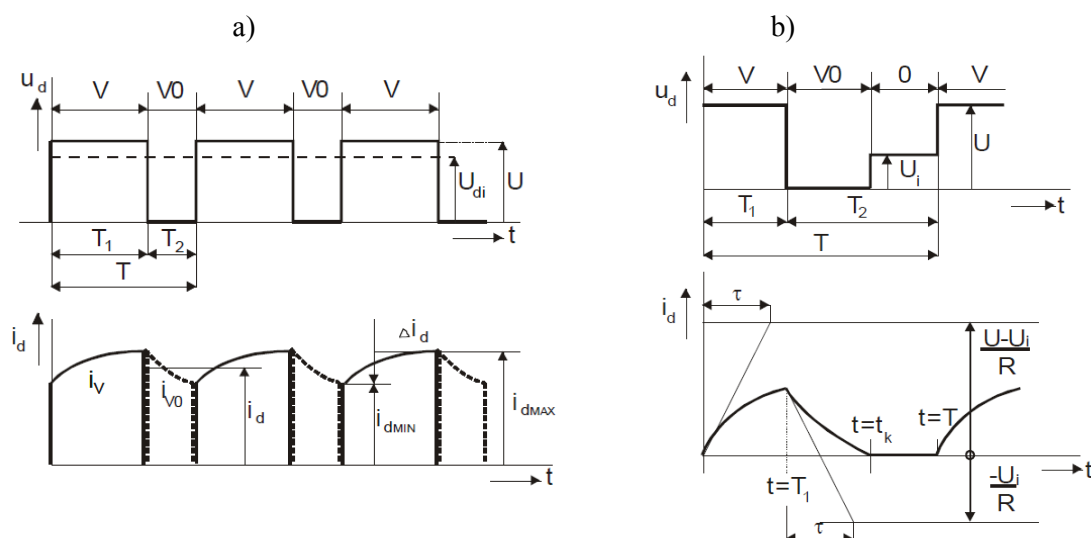
$$U_{di} = \frac{T_1}{T} \cdot U = z \cdot U \quad (4.1)$$

kde  $z$  je poměrná doba zapnutí (zatěžovatel) a je dána poměrem doby sepnutého spínače a doby periody.

Pokud proud v intervalu vypnutého spínače klesne na nulu, jedná se o chod s přerušovaným proudem a průběh napětí na zátěži je odlišný od chodu s nepřerušovaným proudem (Obr. 4.2) V momentu klesnutí proudu na nulu se na zátěži objeví hodnota protinapětí, což trvá do dalšího sepnutí spínače. Z průběhu napětí na zátěži při přerušovaném proudu je patrné, že střední hodnota tohoto napětí se vypočítá:

$$U_{di} = \frac{1}{T} \cdot [U \cdot T_1 + U_i \cdot (T - t_k)] \quad (4.2)$$

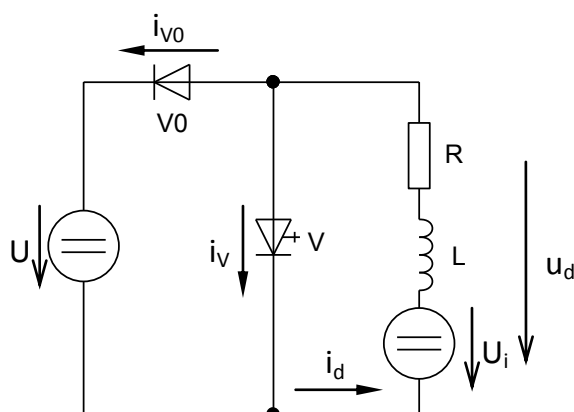
[5]



Obr. 4.2: Průběhy napětí a proudů snižujícího měniče –  
a) při nepřerušovaném proudu, b) při přerušovaném proudu [4]

#### 4.4 Zvyšující měnič

Snižující pulzní měnič umožňuje přenos energie ze zdroje do zátěže. Pokud je potřeba převést energii ze zátěže do zdroje s vyšším napětím, používá se pulzní měnič pro zvyšování napětí nebo tzv. rekuperační měnič. Rekuperace energie se využívá například u elektromobilu, jehož motor je při brzdění v generátorickém režimu. V tomto případě je třeba převést energii ze zdroje s menším napětím (indukované napětí motoru) do zdroje s vyšším napětím (v tomto případě baterie). Pulzní měnič pro zvyšování napětí se skládá ze zdroje napětí, oddělovací diody  $V_0$ , spínače  $V$  a zátěže.

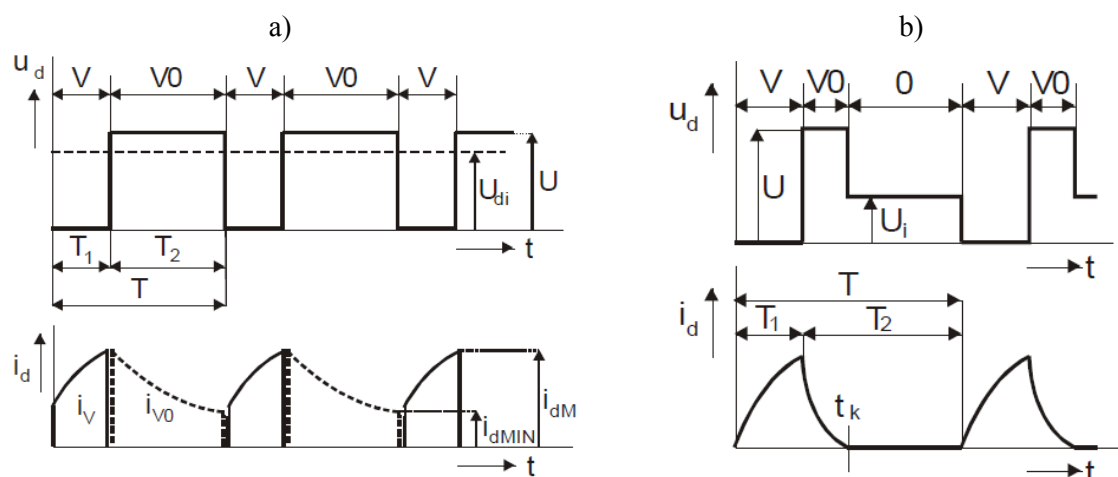


Obr. 4.3: Zvyšující měnič

Při sepnutém spínači je zátěž ve zkratu a je na ní nulové napětí. Proud zátěže roste a uzavírá se přes sepnutý spínač. Část energie z indukovaného zdroje napětí se ztrácí na odporu a část se naakumuluje v indukčnosti. Po vypnutí spínače je na zátěži napájecí napětí. Díky energii naakumulované v indukčnosti proud zátěže teče stejným směrem, klesá a uzavírá se přes diodu  $V_0$ .

a zdroj napětí. Pokud proud v tomto intervalu neklesne k nule, je nepřerušovaný a průběhy veličin odpovídají Obr. 4.4a. Střední hodnota napětí na zátěži je:

$$U_{di} = \frac{T_2}{T} \cdot U = \frac{T - T_1}{T} \cdot U = (1 - z) \cdot U \quad (4.3)$$



Obr. 4.4: Průběhy napětí a proudů zvyšujícího měniče –  
a) při nepřerušovaném proudu, b) při přerušovaném proudu [4]

Průběhy pro nespojitý proud jsou na Obr. 4.4b. V okamžiku klesnutí proudu na nulu se na zátěži objeví indukované napětí  $U_i$ . Avšak pro správnou činnost rekuperace energie ze zdroje indukovaného napětí do napájecího zdroje musí být splněna podmínka nenulového proudu a musí platit  $U_i < U$ . Střední hodnota napětí na zátěži při nespojitém proudu je:

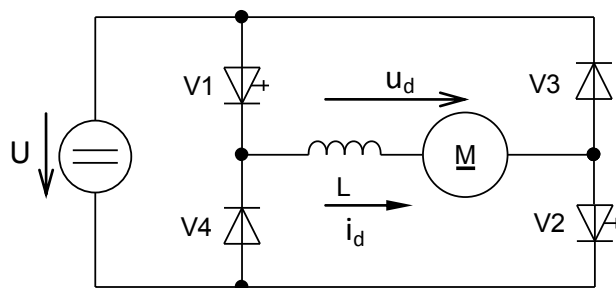
$$U_{di} = \frac{1}{T} \cdot [U \cdot (t_k - T_1) + U_i \cdot (T - t_k)] \quad (4.4)$$

[5]

## 4.5 Dvoukvadrantový měnič s reverzací napětí

Předchozí pulzní měniče umožňují funkci s pracovním bodem umístěným pouze v jednom kvadrantu. Vícekvadrantový provoz měniče je možný s využitím více spínacích součástek. Na Obr. 4.5 je dvoukvadrantový pulzní měnič s reverzací napětí. Proud zátěže tedy teče jedním směrem, polarita napětí nabývá kladných i záporných hodnot.

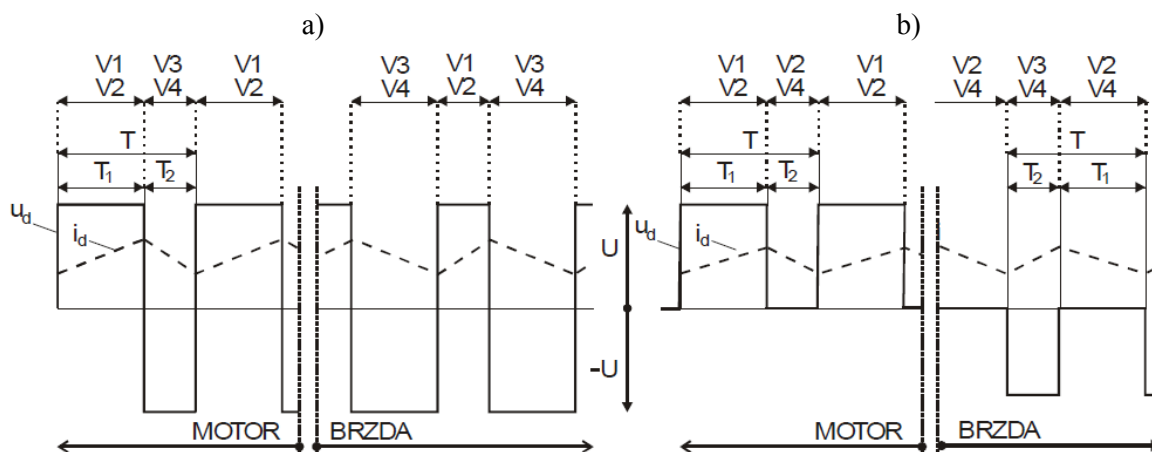




Obr. 4.5: Dvoukvadrantový měnič s reverzací napětí

Při sepnutých spínačích V1 a V2 je na zátěži kladné napětí a proud narůstá. Jsou-li vypnuty, je na zátěži připojeno záporné napětí a doznívající proud teče přes diody V3 a V4. Řízením spínačů V1 a V2 se tedy dá regulovat střední hodnota napětí na zátěži, která se vypočítá podle vztahu (4.5). Z tohoto vztahu je zřejmé, že při zatěžovateli  $z = 0,5$  se dosahuje nulové střední hodnoty napětí.

$$U_{di} = U \cdot \frac{T_1 - T_2}{T} = U \cdot (2 \cdot z - 1) \quad (4.5)$$

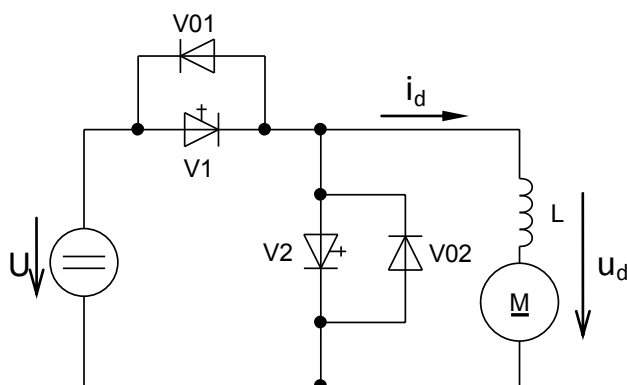
Obr. 4.6: Průběhy napětí a proudů dvoukvadrantového měniče s reverzací napětí –  
; a) s bipolárním řízením, b) s unipolárním řízením [4]

Při zatěžovateli  $z > 0,5$  je střední hodnota napětí na zátěži kladná a energie se přesouvá ze zdroje do zátěže. Pokud je  $z < 0,5$ , střední hodnota napětí je záporná a energie je dodávána ze zátěže do zdroje. Průběhy napětí a proudů pro motorický a generátorický režim motoru jsou na Obr. 4.6a. Nevýhoda je nutnost reverzace svorek kotvy při přechodu z motorického chodu do generátorického. Velké zvlnění napětí a proudů zátěže je další nevýhodou, což je řešeno unipolárním řízením (Obr.4.6b). Po intervalu sepnutých spínačů V1 a V2 zůstává V2 sepnut, doznívající proud protéká přes V2 a V4 a napětí na zátěži je nulové. V generátorickém režimu při procházejícím proudu diodami V3 a V4 je napětí záporné a proud roste. V dalším intervalu proud teče přes V2 a V4 a napětí je nulové. [6]

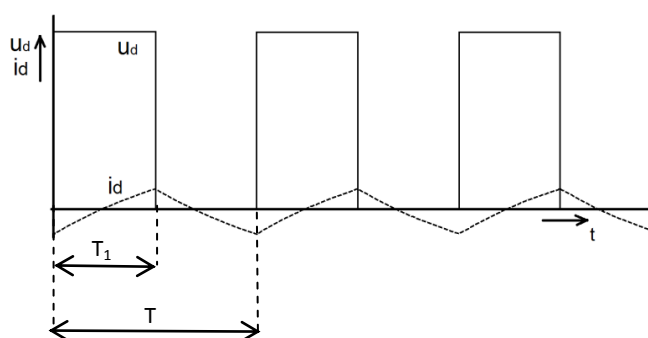
#### 4.6 Dvoukvadrantový měnič s reverzací proudu

Výhodou dvoukvadrantového pulzního měniče s reverzací proudu je, že není nutné přebuzování motoru při přechodu mezi motorickým a generátorickým chodem. Zapojení vzniklo spojením jednokvadrantových měničů pro snižujícího a zvyšujícího. Umožňuje provoz pouze s jednou polaritou napětí a kladným i záporným proudem.

Při činnosti spínače V1 a nulové diody V02 zapojení pracuje jako snižující měnič, energie se dodává ze zdroje do zátěže. Při činnosti spínače V2 a oddělovací diody V01 se energie přesouvá ze zátěže do zdroje, zapojení pracuje jako zvyšující měnič. [6]



Obr. 4.7: Dvoukvadrantový měnič s reverzací proudu



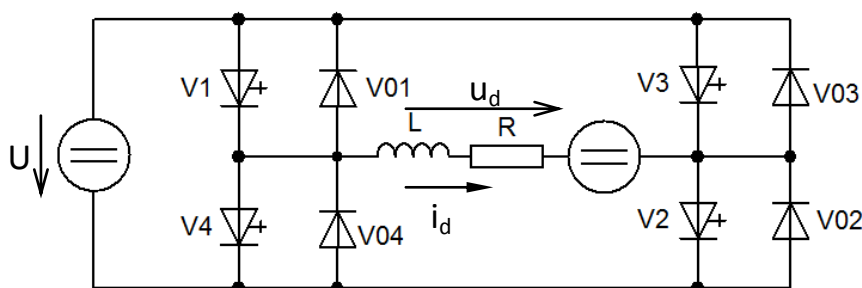
Obr. 4.8: Průběhy napětí a proudu dvoukvadrantového měniče s reverzací proudu

Střední hodnota výstupního napětí se vypočítá obdobně jako u snižujícího měniče:

$$U_{di} = \frac{T_1}{T} \cdot U = z \cdot U \quad (4.6)$$

#### 4.7 Čtyřkvadrantový měnič

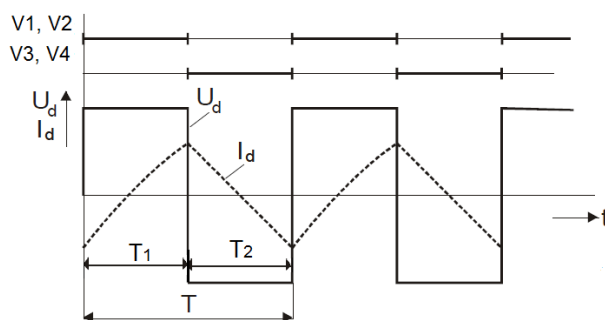
Čtyřkvadrantový pulzní měnič se skládá ze čtyř spínacích prvků, ke kterým jsou antiparalelně připojeny zpětné diody. Pracuje ve čtyřech kvadrantech, tzn. napětí i proud na zátěži mohou nabývat obou polarit. Stejně jako u pulzního měniče s reverzací napětí umožňuje čtyřkvadrantové zapojení bipolární i unipolární řízení.



Obr. 4.9: Čtyřkvadrantový měnič

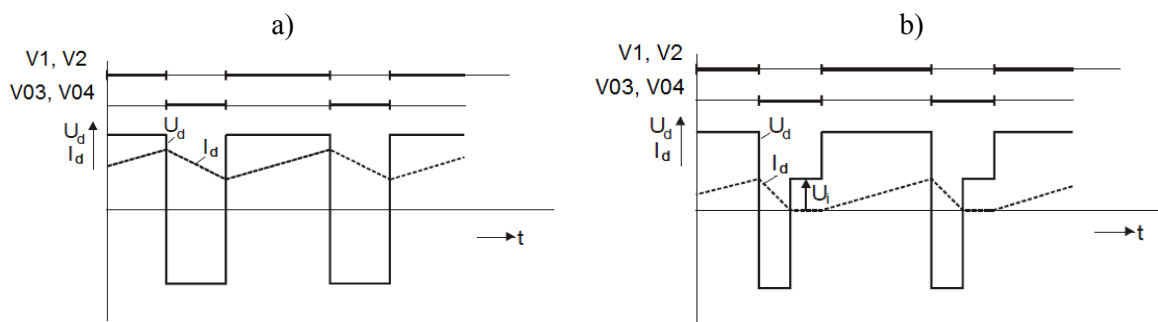
Každá perioda má dva takty. Bipolární řízení se spínáním spínačů V1, V2 v jednom taktu a spínačů V3, V4 v druhém taktu je vyznačeno na Obr 4.10. Střídou spínání se nastavuje střední hodnota napětí na zátěži. Pokud by byla střída 1:1, zapojení by se chovalo jako jednofázový napěťový střídač. Při tomto řízení se na zátěži neobjevuje indukované napětí  $U_i$ . Střední hodnota napětí na zátěži je pak určena vztahem:

$$U_{di} = U \cdot \frac{T_1 - T_2}{T} = U \cdot (2 \cdot z - 1) \quad (4.7)$$



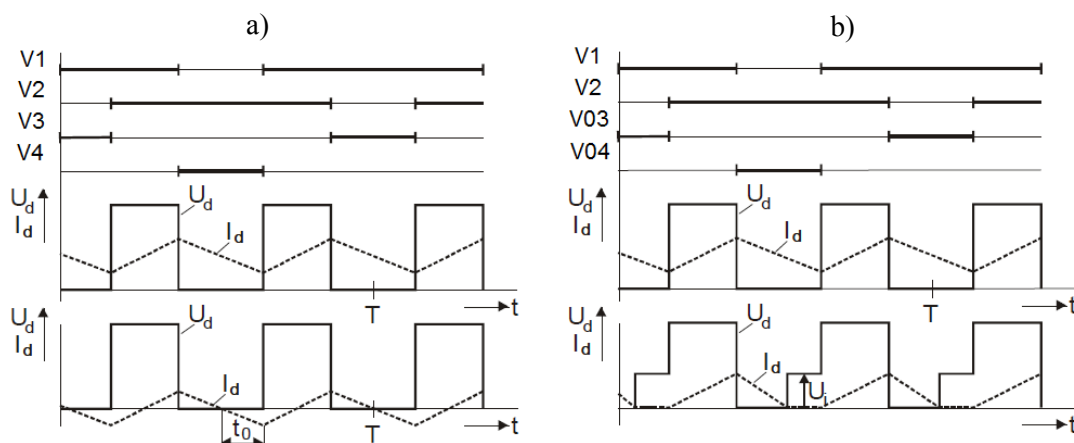
Obr. 4.10: Průběhy napětí a proudu čtyřkvadrantového měniče s bipolárním řízením [4]

Na Obr. 4.11 jsou průběhy s měniče s bipolárním řízením, přičemž v jednom taktu se proud uzavírá přes spínače a ve druhém přes diody tak, jak je naznačeno na spínacím diagramu. Protože klesající proud teče přes diody, vyskytuje se při přerušovaném proudu na výstupu indukované napětí  $U_i$ .



Obr. 4.11: Průběhy napětí a proudu čtyřkvadrantového měniče s bipolárním řízením – při nepřerušovaném proudu, b) při přerušovaném proudu [4]

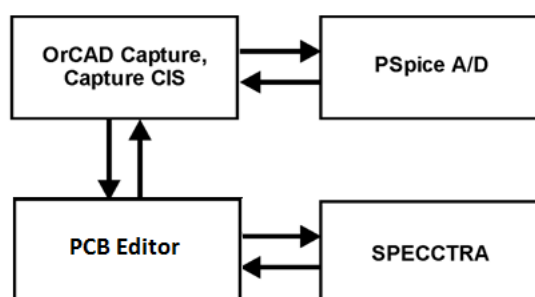
Při unipolárním řízení je na výstupu pouze jedna polarita napětí. Pokud je řízení řešeno pouze spínáním spínačů podle Obr. 4.12a, může být proud kladný i záporný a neprojeví se napětí  $U_i$ . Pokud však proud místo spínačů V3, V4 teče diodami V03, V04, na výstupu bude napětí  $U_i$  při poklesu proudu na nulovou hodnotu (Obr. 4.12b). [4, 6]



Obr. 4.12: Průběhy napětí a proudu čtyřkvadrantového měniče s unipolárním řízením –  
a) proud tekoucí pouze spínači, b) proud tekoucí spínači i diodami [4]

## 5 Popis programu OrCAD

Programový balík OrCad je vyvíjen společností Cadence Design Systems založenou roku 1988. Název OrCad je zkratka slov Oregon a CAD. OrCad se skládá z několika programů. OrCad Capture umožňuje kreslení analogových a digitálních obvodů s širokým výběrem součástek z knihoven a možností editace jejich parametrů. V programu PSpice se provádí různé typy simulací navržených schémat. Pro návrh plošných spojů se používá PCB Editor, který umožňuje práci s knihovnami pouzder jednotlivých součástek a výstupy pro výrobu desek plošných spojů. Z PCB Editoru je přístup do produktu SPECCTRA, který slouží pro autorouting. Tyto části programového balíku pracují v reálném čase, pokud je tedy například v nakresleném schématu umístěna napěťová nebo jiná sonda, průběh konkrétní veličiny se ihned objeví v rozhraní PSpice.



Obr. 5.1: Princip systému OrCad [7]

Pro zkoumání chování obvodů se mohou využít čtyři základní typy analýz: stejnosměrný pracovní bod (Bias Point), stejnosměrná analýza (DC Sweep), střídavá analýza (AC Sweep) a analýza v časové oblasti (Time Domain). Výpočet stejnosměrného pracovního bodu se provádí vždy, je základ pro většinu dalších analýz. Stejnosměrná analýza je opakovaný výpočet stejnosměrného pracovního bodu, přičemž se mění nějaký parametr obvodu. Tím může být například teplota nebo parametry součástek. Tyto parametry se mohou měnit buď lineárně v určitém rozmezí se zadaným pevným krokem, nebo se mohou měnit logaritmicky se zadaným počtem bodů na dekádu. Střídavá analýza slouží pro zjištění závislosti obvodových veličin na frekvenci, přičemž se nejprve vypočítá stejnosměrný pracovní bod, poté se obvod linearizuje a nakonec se vypočítá odezva na signál o zadaných frekvencích. Časová analýza je pravděpodobně nejpoužívanější. Vypočítává hodnoty obvodových veličin určitém časovém intervalu, přičemž se volí vhodný krok podle rychlosti změn veličin v obvodu. K základním typům analýz mohou být použity doplňkové analýzy: krokování parametrů (Parametric Sweep), teplotní analýza (Temperature Sweep) a statistická a toleranční analýza (Monte Carlo/Worst Case).

V této práci se využívá OrCad Capture pro tvoření schémat usměrňovačů a pulzních měničů a PSpice pro analýzu těchto obvodů v časové oblasti. [8]

## 6 Simulace usměrňovačů

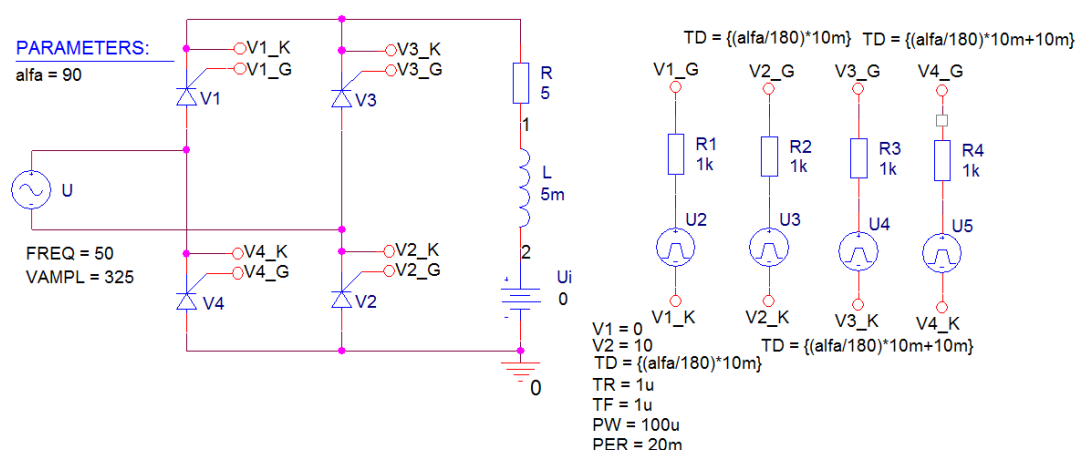
Simulace usměrňovačů jsou provedeny pro dvoupulzní, třípulzní a šestipulzní zapojení. Nejprve je funkce obvodů ověřena pro zapojení s odporovou zátěží a nulovým řídicím úhlem, kde budou zobrazeny průběhy proudů jednotlivými tyristory. Poté jsou provedeny simulace pro další typy zátěží.

Při výběru tyristoru se musí respektovat hodnota napájecího napětí a také proud, který ním bude téct. Podle toho se vybírá tyristor s dostatečně vysokými hodnotami blokovacího a závěrného napětí a propustného proudu. U všech zapojení usměrňovačů je použit tyristor C233M s parametry  $U_{RRM} = 600V$  a  $U_{DRM} = 600V$ . Hodnota minimálního zapínacího proudu je  $I_{GT} = 9\text{ mA}$ . Hodnota proudového impulsu je nastavena na 10mA pomocí hodnoty napětí zdroje VPULSE a hodnoty odporu v sérii zapojeném s tímto zdrojem.

Velikost řídicího úhlu je zadávána v parametru TD (časové zpoždění) zdroje VPULSE (zdroj napěťových pulzů). Toto zpoždění určuje, za jak dlouho od nulového času simulace bude vyslán impuls na řídicí elektrodu tyristoru. Pro nastavení řídicího úhlu je deklarována globální proměnná pomocí pseudosoučástky Parameters a tato proměnná je pak vhodně zapsána v parametru TD tak, aby se hodnota řídicího úhlu mohla nastavovat přímo ve stupních. Musí být také vhodně nastavena perioda opakování tohoto pulzu. Pro frekvenci napájecího napětí 50Hz je perioda nastavena na 20ms (parametr PER zdroje VPULSE).

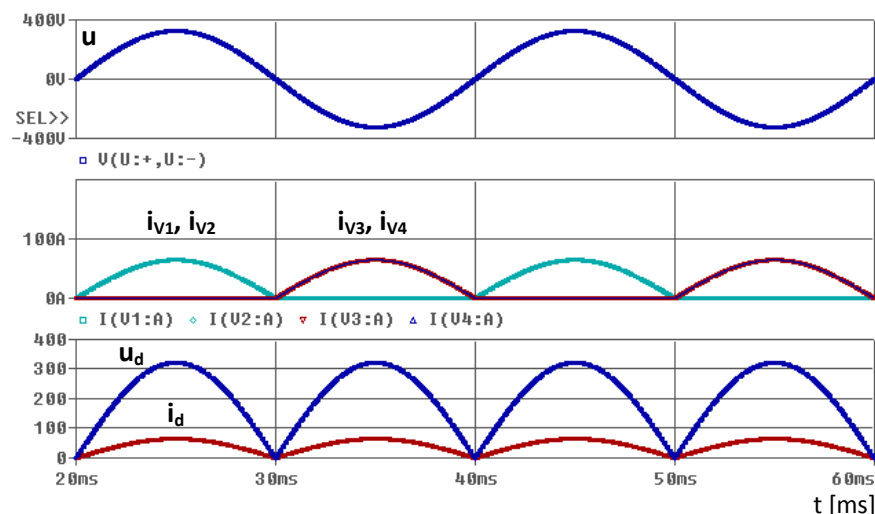
### 6.1 Jednofázový můstkový usměrňovač

Zapojení usměrňovače v OrCADu je na obrázku 6.1. Mezi řídicí elektrodu a katodu tyristorů jsou připojeny pulzní zdroje, které zajišťují zapínací impulsy pro tyristory.



Obr. 6.1: Zapojení jednofázového můstkového usměrňovače

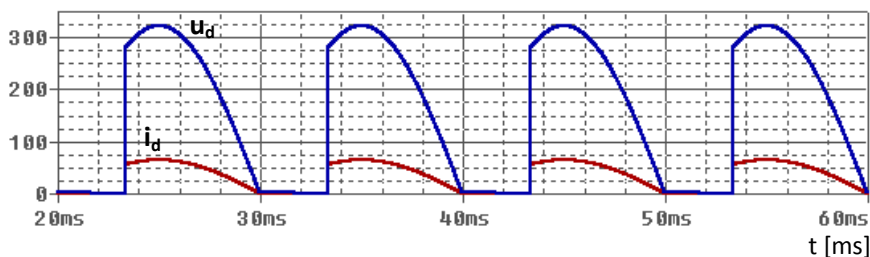
Funkce usměrňovače je nejprve ověřena pro odporovou zátěž a nulový řídicí úhel (Obr. 6.2). Na obrázku je průběh napájecího napětí, průběhy proudů jednotlivými tyristory a výstupní napětí a proud. Jde vidět, že tyristory V1 a V2 vedou proud při kladné polaritě napájecího napětí a tyristory V3 a V4 při záporné polaritě.



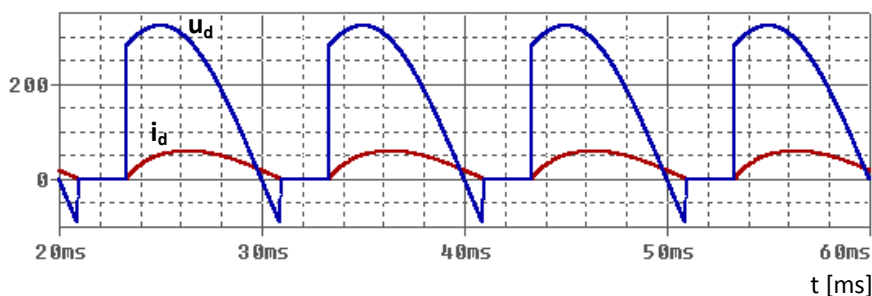
Obr. 6.2: Průběhy napájecího napětí, proudů tyristorů a usměrněného napětí a proudu jednofázového můstkového usměrňovače

Pro zobrazené průběhy se zátěžemi R, RL, RLV0 (s nulovou diodou) a RL+U<sub>i</sub> (kladné protinapětí) je řídicí úhel  $\alpha = 60^\circ$ . Řídicí úhel při zátěži RL-U<sub>i</sub> (záporné protinapětí) je  $120^\circ$ .

Při odporové zátěži je zřejmé, že průběh proudu kopíruje tvar napětí. Výstupní proud usměrňovače se zátěží RL má určité fázové zpoždění za napětím, což je způsobeno indukčností v zátěži. Výstupní průběhy na Obr. 6.4 jsou s nespojitým proudem. Dokud proud neklesne na nulu, výstupní napětí kopíruje průběh napájecího napětí. Takto se na výstupu na krátkou chvíli objevuje záporné napětí. Po klesnutí proudu na nulu je i výstupní napětí nulové až do okamžiku dalšího sepnutí tyristorů.

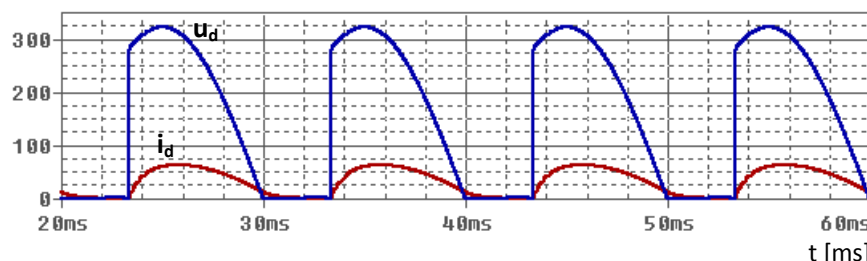


Obr. 6.3: Průběhy napětí a proudu jednofázového můstkového usměrňovače se zátěží R



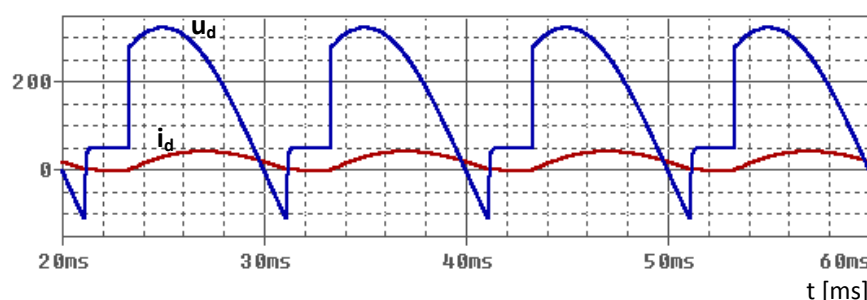
Obr. 6.4: Průběhy napětí a proudu jednofázového můstkového usměrňovače se zátěží RL

Při zapojení zátěže RL s nulovou diodou jsou průběhy obdobné jako při zátěži RL. Avšak ve chvíli, kdy by bylo na zátěži záporné napětí (pro zátěž RL), uzavírá nulová dioda proud zátěží a výstupní napětí je nulové. V zapojení s nulovou diodou tedy není možný střídačový chod usměrňovače.



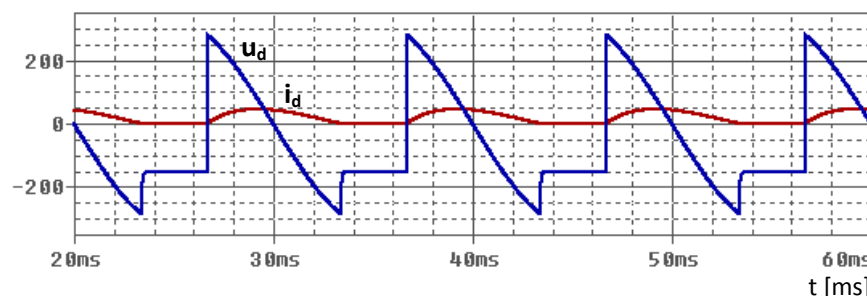
Obr. 6.5: Průběhy napětí a proudu jednofázového můstkového usměrňovače se zátěží RL V0

Na obrázku 6.6 jsou průběhy napětí a proudu usměrňovače se zátěží RL a kladným protinapětím. Výstupní napětí se chová obdobně jako pro zapojení s RL zátěží, ale při klesnutí proudu na nulovou hodnotu se na výstupu objevuje hodnota protinapětí.



Obr. 6.6: Průběhy napětí a proudu jednofázového můstkového usměrňovače se zátěží RL a kladným  $U_i$

Průběhy pro zátěž RL se záporným protinapětím a řídicím úhlem  $\alpha = 120^\circ$  jsou na obrázku 6.7. Než proud klesne na nulovou hodnotu, je na výstupu napájecí napětí, poté protinapětí. Je zřejmé, že v tomto případě usměrňovač pracuje ve střídačovém chodu (střední hodnota napětí je záporná při kladném proudu, výkon je tedy záporný a energie se přesouvá ze zátěže do zdroje).

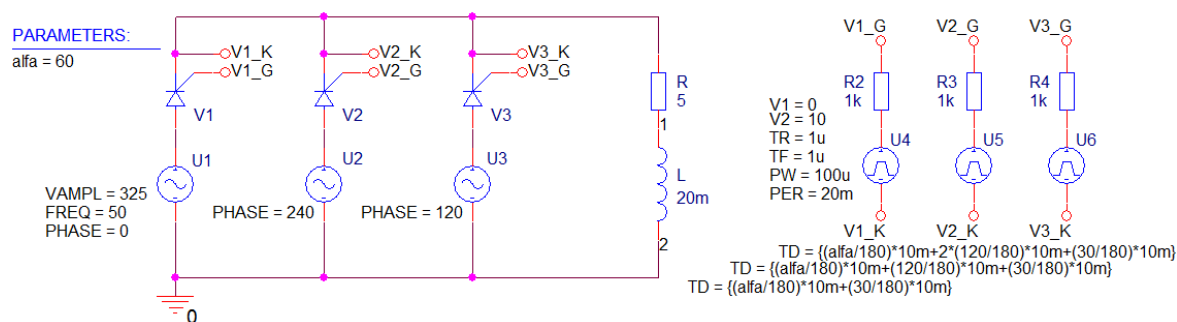


Obr. 6.7: Průběhy napětí a proudu jednofázového můstkového usměrňovače se zátěží RL a záporným  $U_i$



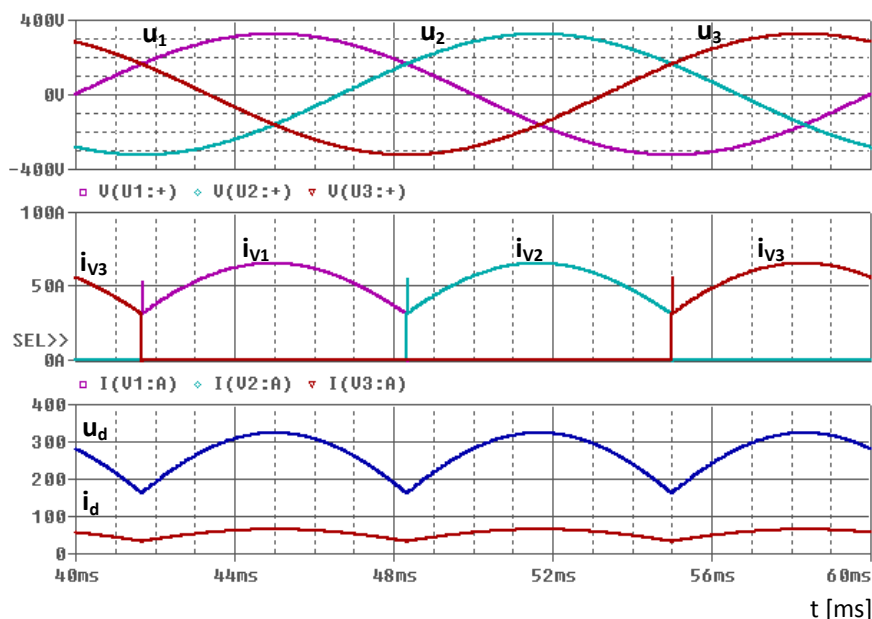
## 6.2 Trojfázový uzlový usměrňovač

Pro třípulzní zapojení je ověřena funkčnost nejprve při čistě odporové zátěži a nulovém řídicím úhlu, kde jsou ukázány i fázová napájecí napětí a proudy jednotlivých tyristorů. Poté jsou provedeny simulace pro zátěže typu R, RL, RLV0, RL+U<sub>i</sub> a RL-U<sub>i</sub>.



*Obr. 6.8: Zapojení trojfázového uzlového usměrňovače*

Obr. 6.9 zobrazuje průběhy napájecích napětí, proudy jednotlivými tyristory a usměrněné napětí a proud při nulovém řídicím úhlu a odporové zátěži. Jde vidět, že tyristory se střídají ve vedení po době  $120^\circ$ . Výstupní napětí je tvořeno jednotlivými maximy napájecích napětí.

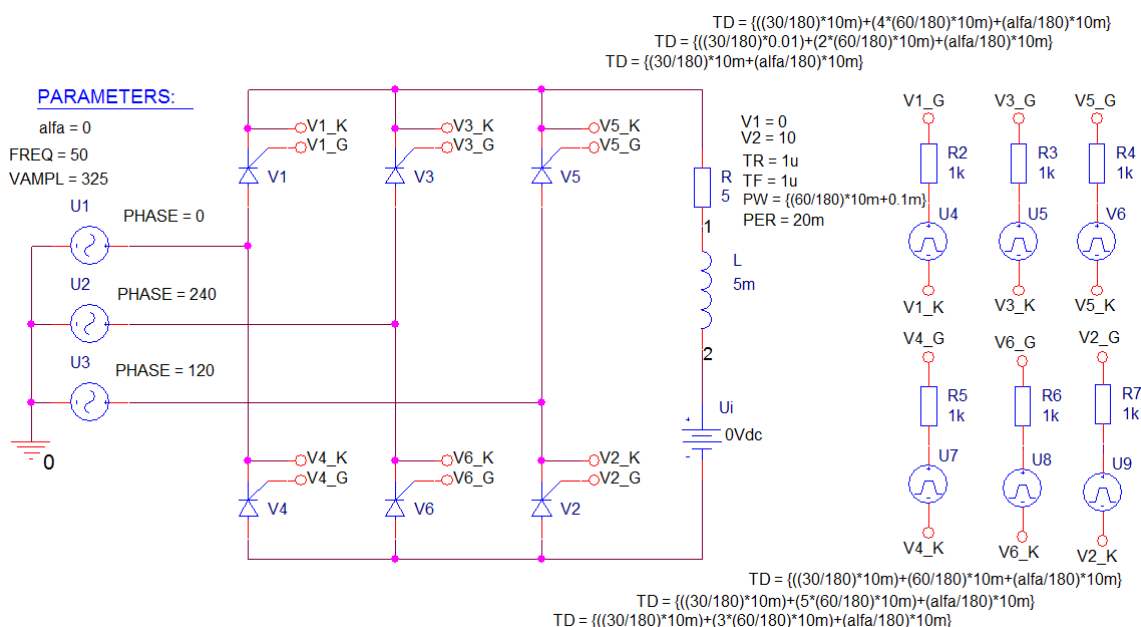


Obr. 6.9: Průběhy napájecích napětí, proudů tyristorů a usměrněného napětí a proudů trojfázového uzlového usměrňovače

Výstupní průběhy napětí a proudu usměrňovače se zátěžemi R, RL, RL s nulovou diodou, RL+U<sub>i</sub> a RL-U<sub>i</sub> (při střídačovém chodu) jsou uvedeny v příloze (Příloha A).

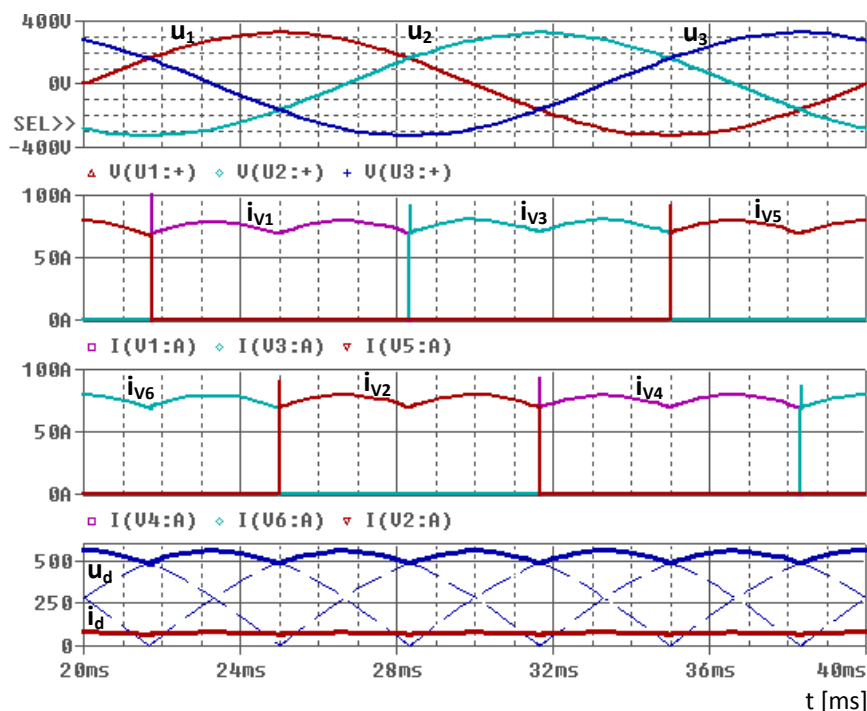
### 6.3 Trojfázový můstkový usměrňovač

Funkce trojfázového můstkového usměrňovače je nejprve ověřena při čistě odporové zátěži a nulovém řídicím úhlu. Dále je ověřena funkčnost při dalších typech zátěže, obdobně jako u předchozích zapojení.



Obr. 6.10: Zapojení trojfázového můstkového usměrňovače

Na Obr. 6.11 jsou průběhy napájecích napětí, proudů jednotlivými tyristory a napětí a proud na zátěži při nulovém řídicím úhlu. Tvar výstupního napětí  $u_d$  nekopíruje fázové napájecí napětí jako u předchozích zapojení, ale je dáno sdruženými napětími mezi jednotlivými fázemi, která jsou naznačena čárkovaně. Z obrázku je patrné, jakým způsobem se tyristory střídají ve vedení proudu. Každý tyristor vždy vede proud po dobu  $120^\circ$ , přičemž jedna dvojice tyristorů vede proud po  $60^\circ$ , než se proud jednoho z tyristorů překomutuje na sousední tyristor.

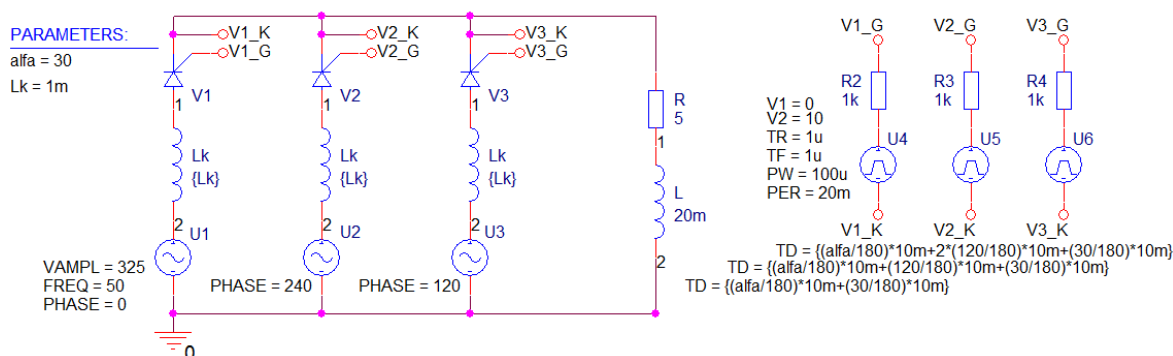


Obr. 6.11: Průběhy napájecích napětí, proudů tyristorů a usměrněného napětí a proudu trojfázového můstkového usměrňovače

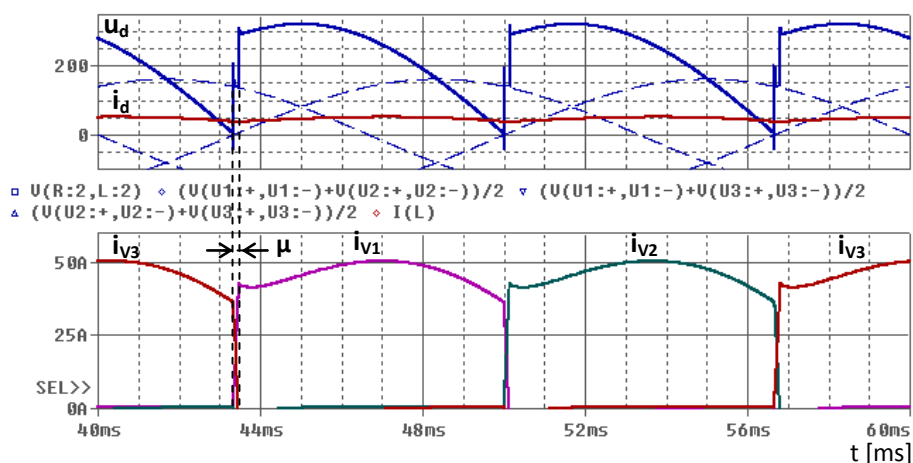
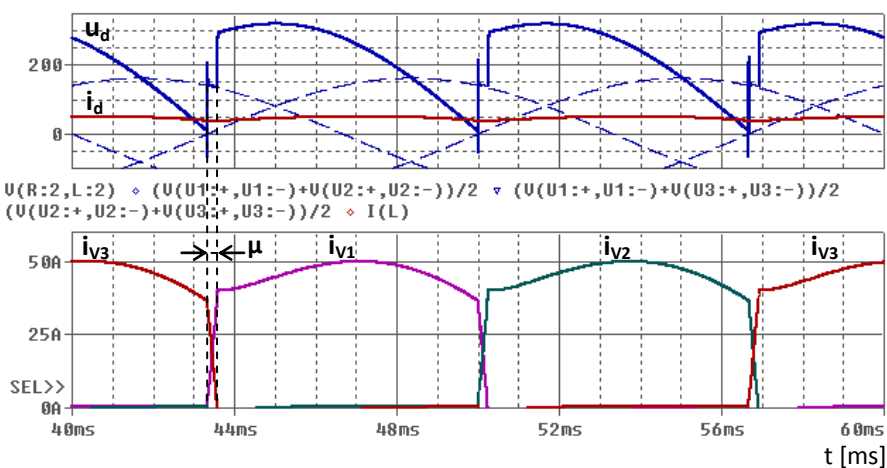
Výstupní průběhy napětí a proudu usměrňovače pro zátěže R, RL, RL s nulovou diodou, RL+U<sub>i</sub> a RL-U<sub>i</sub> (při střídačovém chodu) jsou uvedeny v příloze (Příloha B).

## 6.4 Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje

Vliv velikosti vnitřní impedance zdroje je analyzován pro trojfázové uzlové zapojení usměrňovače. Zapojení s indukčností  $L_k$ , reprezentující vnitřní reaktanci zdroje, je na Obr. 6.12.



Obr. 6.12: Zapojení trojfázového uzlového usměrňovače s vnitřní reaktancí

Obr. 6.13: Průběhy napětí a proudů usměrňovače s  $L_k=0,5 \text{ mH}$ Obr. 6.14: Průběhy napětí a proudů usměrňovače s  $L_k=1 \text{ mH}$ 

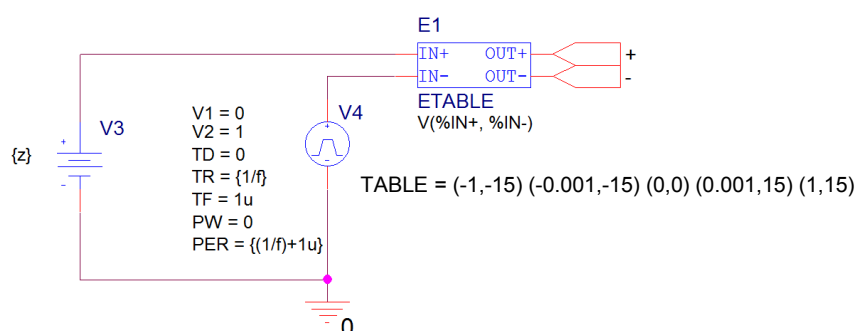
Na rozdíl od zapojení s ideálním zdrojem neprobíhá komutace okamžitě, ale trvá určitou dobu. Na obrázcích jsou průběhy s hodnotami indukčnosti zdroje  $L_k = 0,5 \text{ mH}$  a  $L_k = 1 \text{ mH}$ . Je zřejmé, že čím vyšší je hodnota  $L_k$ , tím větší je úhel komutace  $\mu$ . Jak je patrné z průběhů, s rostoucím úhlem komutace se zmenšuje střední hodnota výstupního napětí.

## 7 Simulace DC/DC měničů

Velikost výstupního napětí stejnosměrných měničů je řízena spínáním součástek. V modelech měničů jsou použity IGBT tranzistory, které jsou řízeny blokem PWM (pulzní šířková modulace). Ve všech zapojeních měničů je použit tranzistor CM75DY-12H s maximálním napětím  $U_{CE} = 600 \text{ V}$  a maximálním proudem kolektoru  $I_C = 75 \text{ A}$ . Hodnota zatěživatele a frekvence spínání tranzistoru se zadávají jako globální proměnné.

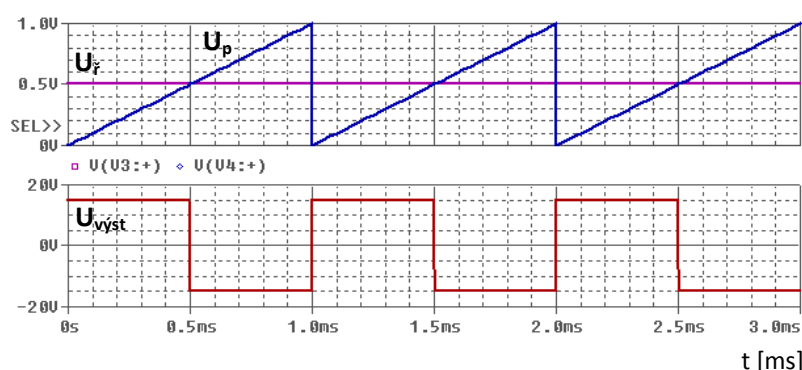
### 7.1 Blok PWM

Blok PWM se skládá ze stejnosměrného zdroje napětí (řídící napětí), pulzního zdroje (pilovitý signál) a bloku ETABLE (komparátor), na jehož výstupu je  $\pm 15 \text{ V}$ .



Obr. 7.1: Zapojení bloku PWM

Princip PWM spočívá v komparaci řídicího napětí s pilovitým signálem. Výstupní napětí PWM bloku je  $+15 \text{ V}$  při  $U_r > U_p$  a  $-15 \text{ V}$  při  $U_r < U_p$ . Na Obr. 7.2 je příklad průběhů pro zatěživatel  $z = 0,5$ .

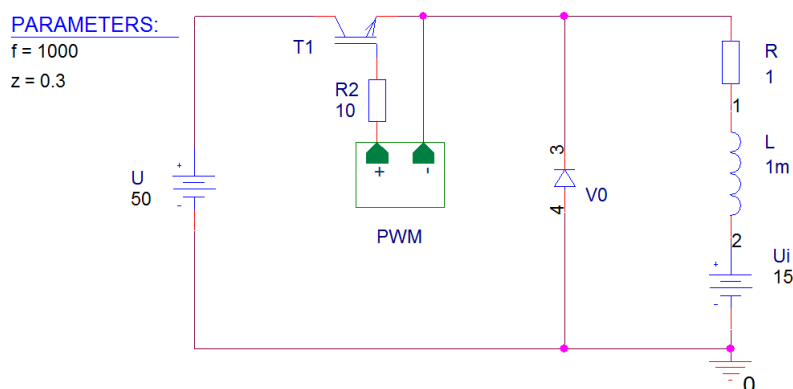


Obr. 7.2: Průběhy PWM

Rozsah řídicího napětí se pohybuje v rozmezí od 0 do 1V, zadávané řídicí napětí tedy odpovídá zatěživateli. Jelikož se v závislosti na řídicím napětí mění doba sepnutí spínacího prvku a perioda zůstává neměnná, jedná se o řízení s konstantní spínací frekvencí (způsoby řízení jsou popsány v kapitole 4.2).

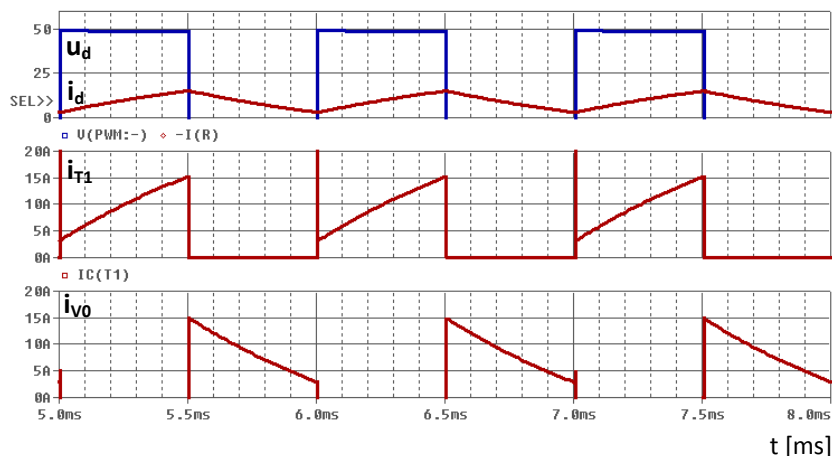
## 7.2 Snižující měnič

Schéma zapojení v OrCADu je tvořeno samotným pulzním měničem a blokem PWM, který řídí spínání tranzistoru a je zapojen jako hierarchický blok. Spínací frekvence a zatěžovatel se nastavují jako globální proměnné.



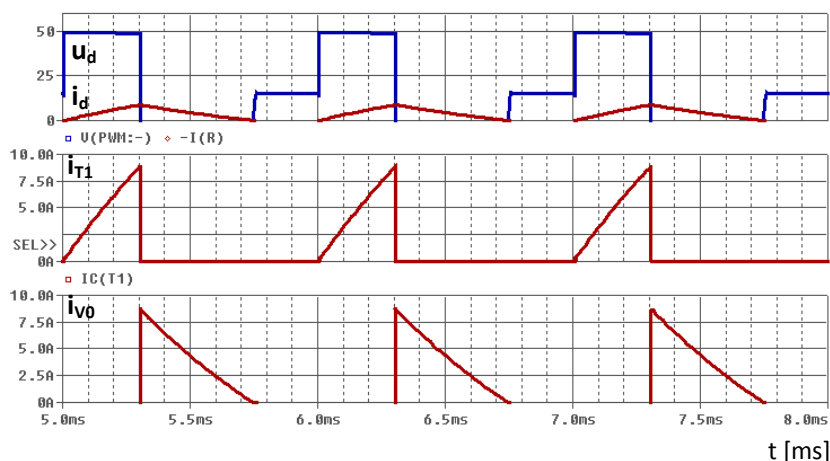
Obr. 7.3: Zapojení snižujícího měniče

Na Obr. 7.4 jsou průběhy napětí a proudů měniče při zatěžovateli  $z = 0,5$  a spojitým proudem. Je zřejmé, že při sepnutém tranzistoru je na zátěži hodnota napájecího napětí a proud narůstá. Po vypnutí spínače se obvod klesajícího proudu uzavírá přes nulovou diodu a napětí na zátěži je nulové.



Obr. 7.4: Průběhy napětí a proudu snižujícího měniče při spojitém proudem

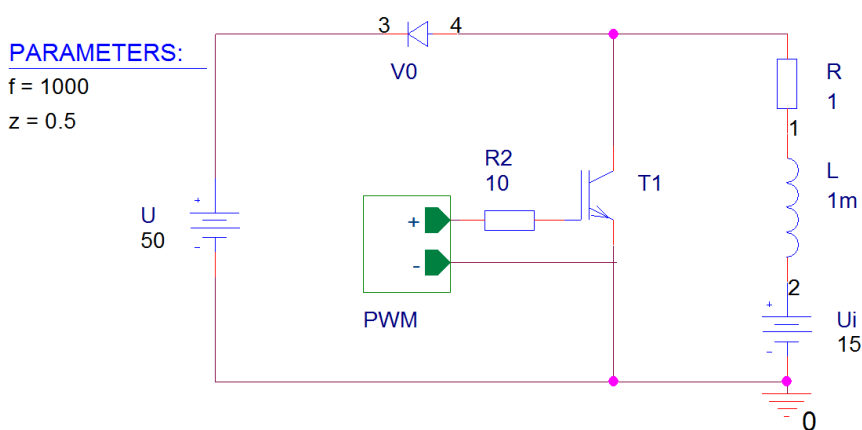
Průběhy s nespojitým proudem na Obr.7.5 jsou simulovány při zatěžovateli  $z = 0,3$ . Průběhy se chovají podobně jako u předchozího případu, avšak v momentě klesnutí proudu na nulovou hodnotu se na zátěži objevuje hodnota indukovaného napětí, v tomto případě  $U_i = 15 V$ . S dalším sepnutím tranzistoru se hodnota na zátěži změní na hodnotu napájecího napětí a proces se opakuje.



Obr. 7.5: Průběhy napětí a proudu snižujícího měniče při nespojitém proudu

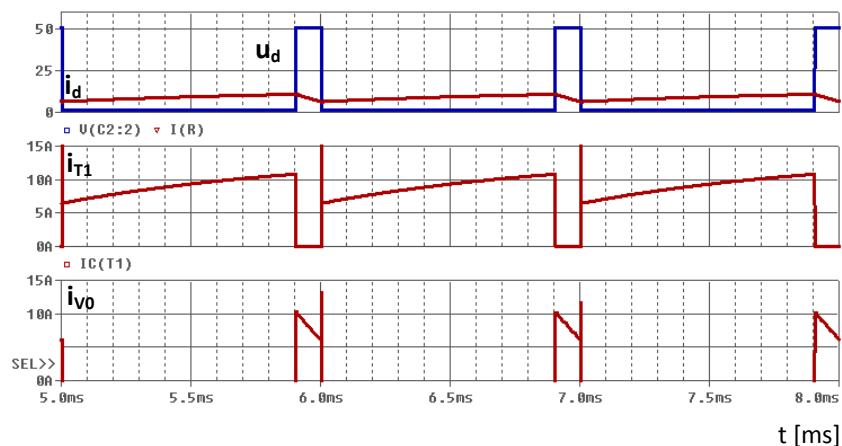
### 7.3 Zvyšující měnič

Zapojení je opět tvořeno samotným měničem a PWM blokem sloužícím ke spínání tranzistoru. Zátěž je předpokládána aktivní, tedy  $RL+U_i$ . Výstupy jsou zobrazeny pro spojitý i nespojitý proud.



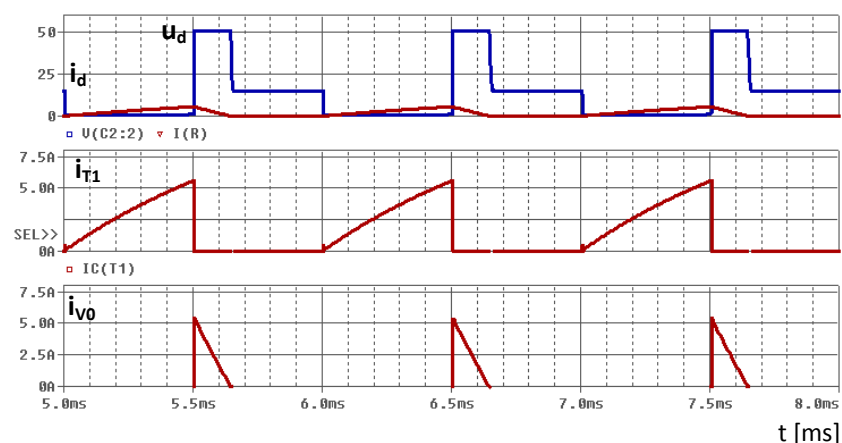
Obr. 7.6: Zapojení zvyšujícího měniče

Obrázek 7.7 ukazuje průběhy obvodových veličin při spojitém proudu ( $z = 0,9$ ). Při sepnutém spínači je na zátěži nulové napětí a rostoucí proud se uzavírá přes tranzistor a zátěž. V momentě rozepnutí tranzistoru se na zátěži objevuje hodnota napájecího napětí a klesající proud se nyní uzavírá přes zátěž, nulovou diodu a stejnosměrný zdroj napětí.



Obr. 7.7: Průběhy napětí a proudu zvyšujícího měniče při spojitém proudu

Při nespojitém proudu se obvod chová obdobně jako při spojitém proudu, avšak po klesnutí proudu zátěže na nulu se na zátěži objeví hodnota indukovaného napětí a proud je nulový až do dalšího sepnutí spínače.

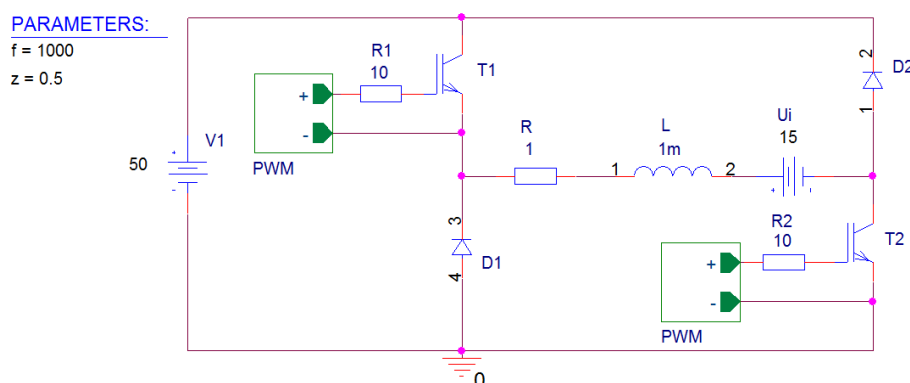


Obr. 7.8: Průběhy napětí a proudu zvyšujícího měniče při nespojitém proudu

## 7.4 Dvoukvadrantový měnič s reverzací napětí

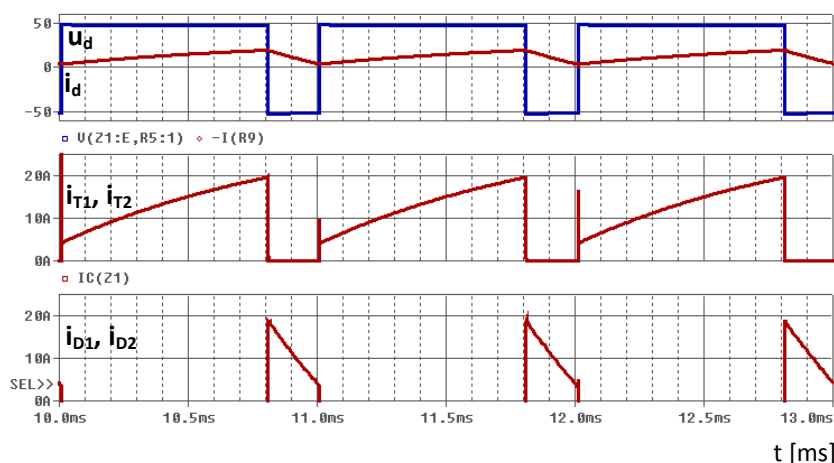
K řízení tranzistorů jsou použity dva bloky PWM, které spínají zároveň. Zátěž se uvažuje aktivní  $RL+U_i$ .





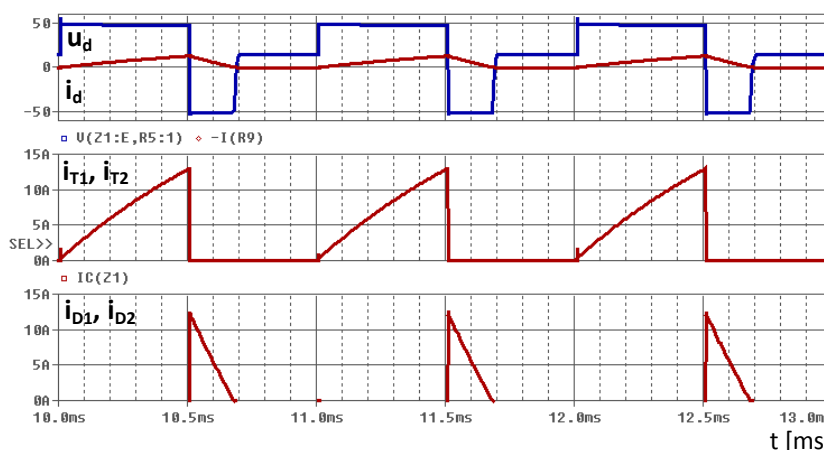
Obr. 7.9: Zapojení dvoukvadrantového měniče s reverzací napětí

Na obrázku 7.10 jsou průběhy měniče s reverzací napětí při spojitém proudu při zatěžovateli  $z = 0,8$ . Na průbězích lze vidět, že při sepnutých tranzistorech je zátěž připojena na kladné napájecí napětí a rostoucí proud ( $i_{T1}$ ,  $i_{T2}$ ) se uzavírá přes tyto tranzistory a zátěž. Po vypnutí tranzistorů teče doznívající proud ( $i_{D1}$ ,  $i_{D2}$ ) zátěží stejným směrem, přičemž se uzavírá přes diody a napětí na zátěži je záporné.



Obr. 7.10: Průběhy napětí a proudu dvoukvadrantového měniče s reverzací napětí při spojitém proudu

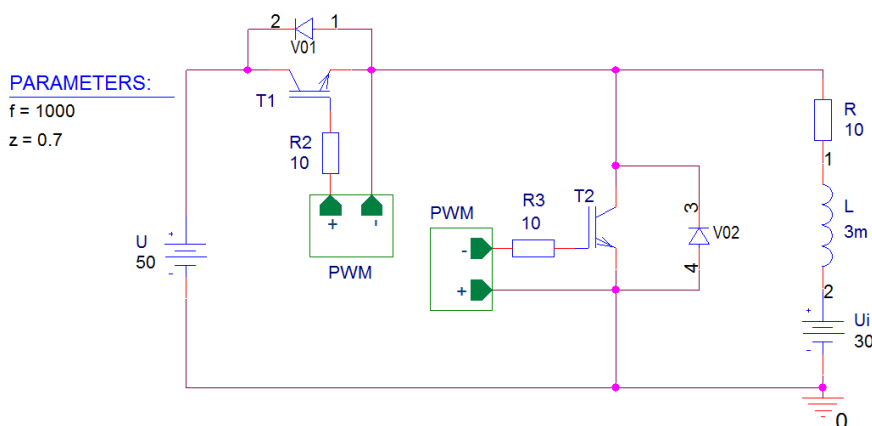
Průběhy při nespojitém proudu jsou podobné, avšak po klesnutí proudu tekoucího přes diody na nulu se na zátěži objevuje hodnota indukovaného napětí, což trvá do následujícího cyklu.



Obr. 7.11: Průběhy napětí a proudu dvoukvadrantového měniče s reverzací napětí při nespojitém proudu

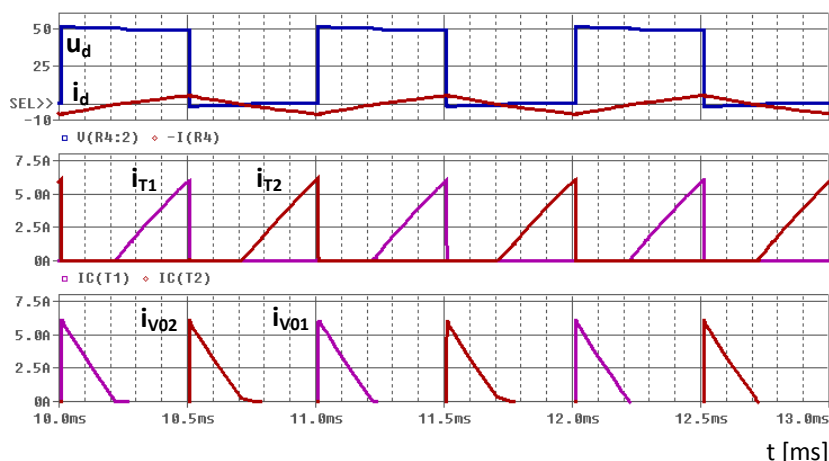
## 7.5 Dvoukvadrantový měnič s reverzací proudu

V zapojení měniče s reverzací proudu jsou tranzistory spínány střídavě. Při jednom sepnutém tranzistoru tedy nesmí být sepnutý druhý. To je zajištěno přepólováním svorek PWM bloku u tranzistoru T2, kde minusový výstup je připojen na řídicí elektrodu tranzistoru.



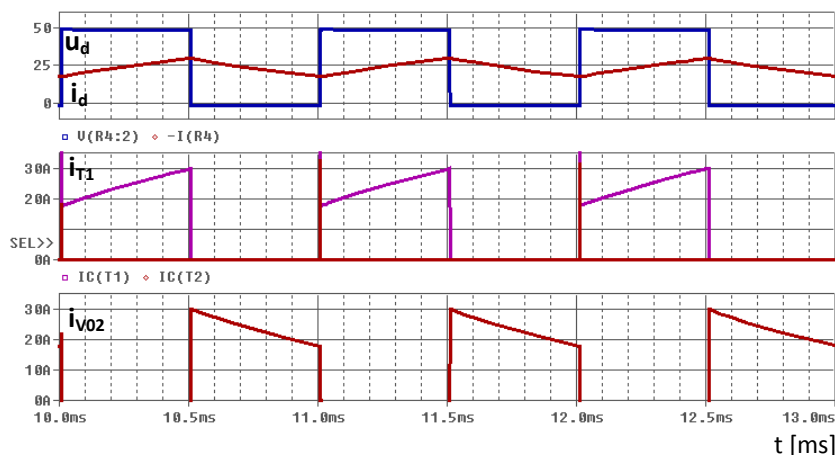
Obr. 7.12: Zapojení dvoukvadrantového měniče s reverzací proudu

Tohle zapojení umožňuje proud zátěže obou polarit a pouze kladné napětí. Na Obr. 7.13 jsou průběhy pro tenhle případ, proud střídá svou polaritu. Při sepnutém tranzistoru T1 je na zátěži hodnota napájecího napětí a rostoucí proud se uzavírá přes T1, zátěž a zdroj stejnosměrného napětí. Po vypnutí tranzistoru T1 a zapnutí T2 je na zátěži nulové napětí a doznívající proud se uzavírá přes nulovou diodu V02. Až po klesnutí proudu na nulu začíná téct rostoucí proud přes tranzistor T2. Tento proud se uzavírá přes zátěž a T2. Ve chvíli, kdy se vypne T2 a zapne T1, je na výstupu hodnota napájecího napětí a doznívající proud se uzavírá přes zátěž a nulovou diodu V01. Až proud klesne na nulu, začne opět téct opačným směrem přes tranzistor T1.



Obr. 7.13: Průběhy napětí a proudu dvoukvadrantového měniče s reverzací proudu při  $U_i = 25\text{ V}$

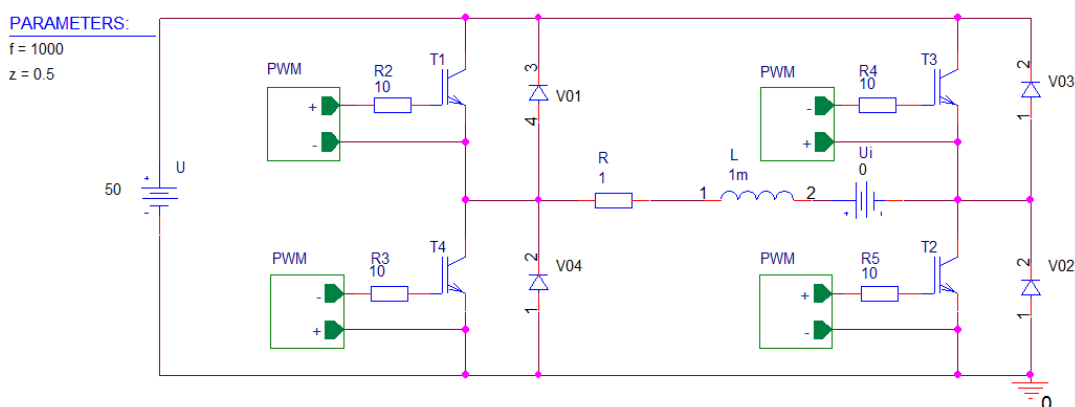
Obrázek 7.14 ukazuje průběhy měniče, kdy proud zátěže teče pouze jedním směrem. Při sepnutém tranzistoru T1 je na výstupu hodnota napájecího napětí a rostoucí proud je uzavírán přes T1 a zátěž. Po vypnutí tranzistoru T1 a zapnutí T2 je na výstupu nulová hodnota napětí a klesající proud zátěže je uzavírán přes nulovou diodu V02. Poté se cyklus opakuje. Protože proud zátěže nestihne klesnout k nule, nedostává se do vedení tranzistor T2 a ani dioda V01. Zapojení se tedy při pouze kladném proudu chová jako snižující měnič.



Obr. 7.14: Průběhy napětí a proudu dvoukvadrantového měniče s reverzací proudu při  $U_i = 0\text{ V}$

## 7.6 Čtyřkvadrantový měnič

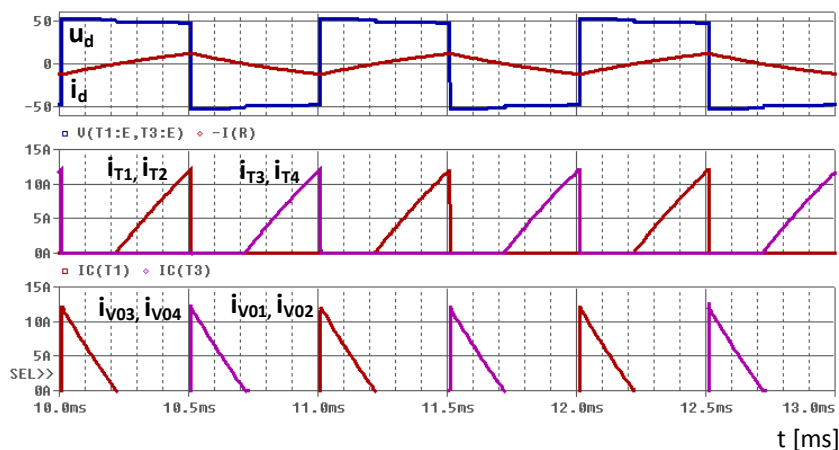
Při bipolárním řízení čtyřkvadrantového měniče se střídavě zapínají dvojice tranzistorů T1, T2 a T3, T4. Aby se tyto dvojice tranzistorů zapínaly střídavě, mají PWM bloky tranzistorů T3 a T4 přepólovány výstupní svorky.



Obr. 7.15: Zapojení čtyřkvadrantového měniče

Průběhy napětí a proudu zátěže na Obr. 7.16 odpovídají zatěžovateli  $z = 0,5$ . Pulzní měnič funguje při tomto zatěžovateli jako jednofázový napěťový střídač, přičemž střední hodnota napětí je nulová.

Při sepnutých tranzistorech T1 a T2 je na zátěži připojeno kladné napájecí napětí a rostoucí proud ( $i_{T1}$ ,  $i_{T2}$ ) se přes tyto tranzistory uzavírá. Jakmile se tranzistory T1 a T2 vypnou a zapnou se T3 a T4, je na zátěži připojeno záporné napájecí napětí. Proud ( $i_{V03}$ ,  $i_{V04}$ ) nejprve klesá k nule přes diody V03 a V04, poté se dostávají k vedení proudy tranzistory T3 a T4. Proud zátěže má nyní zápornou polaritu. Až se opět zapnou tranzistory T1 a T2 a tranzistory T3 a T4 se vypnou, je na výstupu kladné napětí a doznívající proud ( $i_{V01}$ ,  $i_{V02}$ ) teče přes diody V01 a V02. Poté se proces opakuje.



Obr. 7.16: Průběhy napětí a proudu čtyřkvadrantového měniče při bipolárním řízení

## 8 Závěr

Úkolem práce bylo provést teoretický rozbor usměrňovačů a DC/DC měničů, vytvořit simulační modely těchto obvodů v programu OrCAD a ověřit jejich funkčnost. V teoretickém rozboru usměrňovačů je provedeno jejich rozdělení a popsány jsou usměrňovače jednopulzní, dvoupulzní, trojpulzní a šestipulzní. Rozbor popisuje také vliv vnitřní impedance zdroje na průběh komutace. Teoretická část DC/DC měničů popisuje jejich základní rozdělení a možnosti řízení těchto měničů. Jsou vysvětleny funkce DC/DC měniče snižujícího a zvyšujícího, tedy jednokvadrantových, dále dvoukvadrantových s reverzací proudu a s reverzací napětí a princip čtyřkvadrantového měniče.

V praktické části jsou uvedeny vytvořené simulační modely usměrňovačů a DC/DC měničů. U všech modelů usměrňovačů je funkčnost ověřena nejprve pro nulový řídicí úhel a odporovou zátěž, kde jsou zobrazeny i proudy jednotlivých tyristorů a napájecích napětí. Dále jsou provedeny simulace všech těchto zapojení pro nenulové řídicí úhly se zátěžemi R, RL, RL s nulovou diodou a RL s kladným i záporným protinapětím. Invertorový chod usměrňovače je ověřen při zátěžích se záporným protinapětím a s řídicím úhlem  $120^\circ$ , kde je z průběhů zřejmé, že střední hodnota napětí je záporná. Simulací je také ověřen vliv vnitřní impedance zdroje. Čím vyšší je reaktance zdroje, tím déle trvá komutace proudu mezi tyristory.

V části simulací DC/DC měničů jsou zobrazeny výsledky simulací všech teoreticky rozebraných měničů. V zapojeních jsou použity IGBT tranzistory, jejichž řízení je vyřešeno pomocí bloku PWM zapojeným jako hierarchický blok. Parametry tohoto bloku, tedy řídicí napětí a frekvence, jsou nastavitelné pomocí proměnných. Funkce měničů snižujícího, zvyšujícího a dvoukvadrantového s reverzací napětí jsou ověřeny jak pro spojitý, tak nespojitý proud, kde lze vidět, jak jsou při přerušovaném proudu výstupní průběhy napětí ovlivněny protinapětím v zátěži. Z ověření funkce dvoukvadrantového měniče s reverzací proudu vyplývá, že při pouze kladném proudu zátěže se měnič chová jako snižující měnič. Funkce čtyřkvadrantového zapojení je ověřena při bipolárním řízení a jsou zobrazeny proudy jednotlivými tranzistory a diodami.

Jelikož jsou parametry obvodů (řídicí úhel, zatěžovatel, frekvence) lehce nastavitelné pomocí globálních proměnných, je možné použít tyto simulační modely při výuce polovodičových měničů. Jednoduše se může sledovat chování obvodů při různých provozních stavech a zátěžích. Také se snadno zobrazí průběh napětí nebo proudu na kterékoliv součástce v obvodu, což může pomoci pochopit základní princip a fungování těchto měničů.

Rozvinutím řešené problematiky by mohly být simulace zapojení vycházející z uvedených obvodů. Ze dvou trojfázových můstkových usměrňovačů může být vytvořen usměrňovač dvanáctipulzní, popř. se tato zapojení mohou použít k vytvoření cyklokonvertoru. Rozšířením stejnosměrných měničů může být simulace trojfázového zapojení, které poskytuje výstupní proud s menším zvlněním.

## Použitá literatura

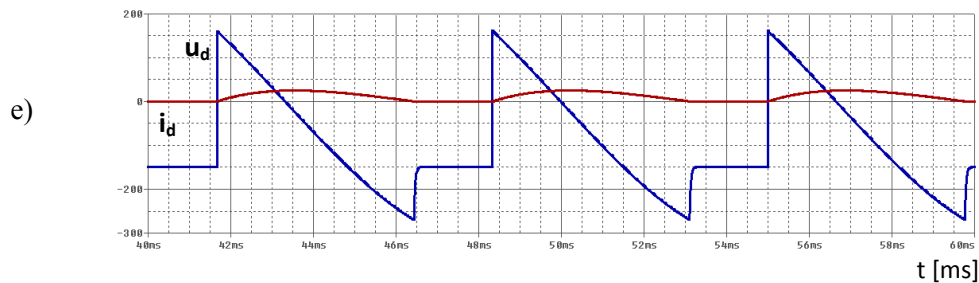
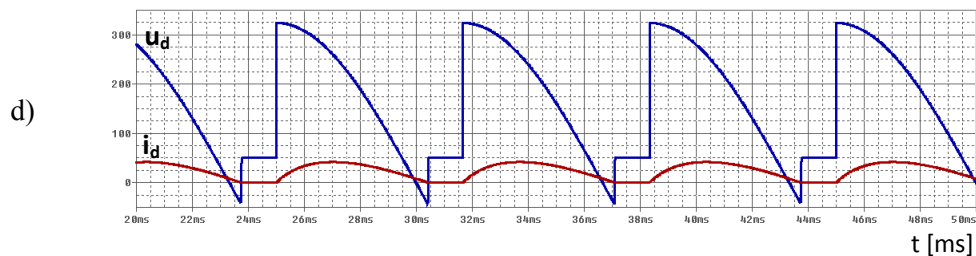
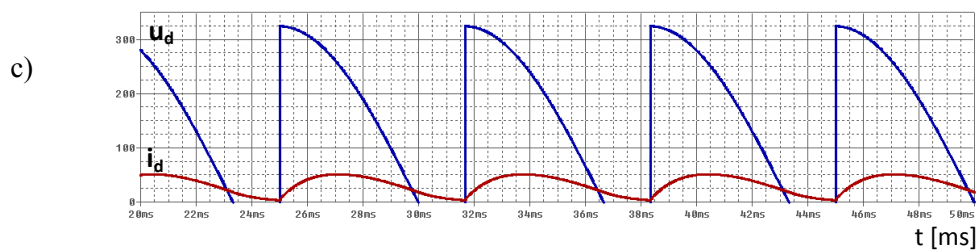
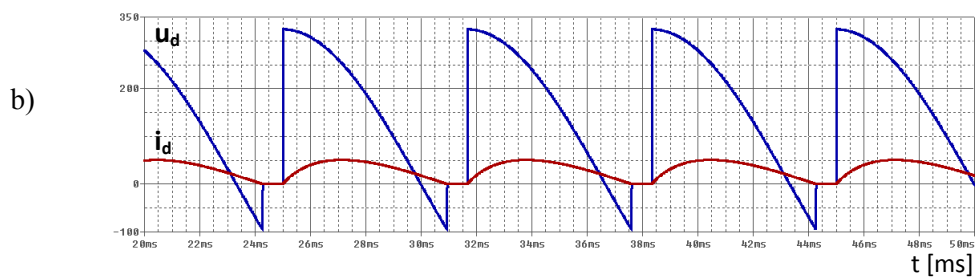
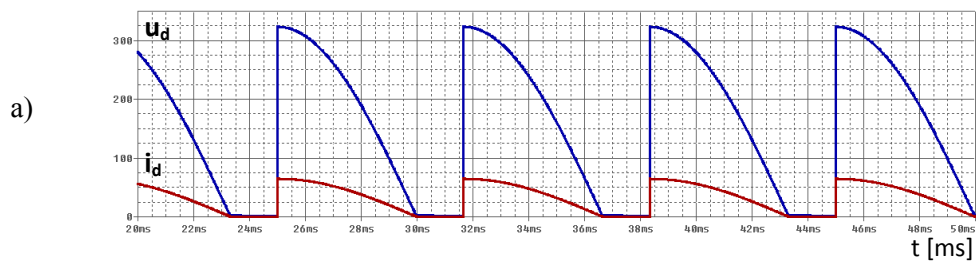
1. **Pavelka, Jiří a Čeřovský, Zdeněk.** *Výkonová elektronika*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02094-0.
2. **Rashid, Muhammad H.** *Power Electronics: circuits, devices and applications*. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1993. ISBN 0-13-334483-5.
3. **Vondrášek, František.** *Výkonová elektronika. Svazek II, Měniče s vnější komutací*. Plzeň : Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-137-X.
4. **Chlebiš, Petr.** *Výkonová elektronika I pro kombinované a distanční studium*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2003.
5. **Vondrášek, František.** *Výkonová elektronika - teorie měničů. Část II, Stejnoseměrné spínače a měniče, střídače, měniče kmitočtu, střídavé spínače a měniče napětí*. Plzeň : Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1981.
6. **Vondrášek, František.** *Výkonová elektronika. Svazek III, Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. Plzeň : vydavatelství Západočeské univerzity, 1998. ISBN 80-7082-485-9.
7. **Záhlava, Vít.** *Návrh plošných spojů a EMC*. [Online] 2009.  
[www.micro.feld.cvut.cz/home/zahlava/ppn/cviceni/PSpice.ppt](http://www.micro.feld.cvut.cz/home/zahlava/ppn/cviceni/PSpice.ppt).
8. **Záhlava, Vít.** *OrCAD 10*. Praha : Grada Publishing, 2004. ISBN 80-247-0904-X.

## Seznam příloh

- Příloha A: Průběhy napětí a proudů trojfázového uzlového usměrňovače při různých typech zátěže
- Příloha B: Průběhy napětí a proudů trojfázového můstkového usměrňovače při různých typech zátěže

Příloha A: Průběhy napětí a proudů trojfázového uzlového usměrňovače při různých typech zátěže

a)  $R$ , b)  $RL$ , c)  $RLV0$ , d)  $RL+U_i$  e)  $RL-U_i$





Příloha B: Průběhy napětí a proudů trojfázového můstkového usměrňovače při různých typech zátěže

a)  $R$ , b)  $RL$ , c)  $RLV0$ , d)  $RL+U_i$  e)  $RL-U_i$

